



**Luís Carlos  
Rocha  
Santos**

**Fragmentação e Classificação na Empresa  
BRIMO – Quartzitos de Mouquim**



**Luís Carlos  
Rocha  
Santos**

**Fragmentação e Classificação na Empresa  
BRIMO – Quartzitos de Mouquim**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia geológica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Fernando Ernesto Rocha de Almeida, Professor Associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.



## O júri

presidente

**Professor Doutor Jorge Manuel Pessoa Girão Medina**

Professor Auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

**Professor Doutor Fernando Ernesto Rocha de Almeida**

Professor Associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

**Engenheiro Telmo Daniel Monteiro Soares**

Engenheiro Geólogo, Diretor Técnico da Empresa Polimagra, Granitos S.A.

## **agradecimentos**

Em primeiro lugar agradeço à empresa BRIMO – Britas de Mouquim, pela oportunidade de estagiar nas suas instalações. Assim como a alguns dos seus funcionários, nomeadamente:

Sr. António Carvalho, pela oportunidade de estagiar na BRIMO.

Sr. Joaquim Lopes, pela preciosa ajuda e acompanhamento prestados durante o estágio.

Ao Sr. Joaquim Fernandes, por todo o esclarecimento prestado.

E a todos os demais nesta empresa.

Quero agradecer também ao Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, pela disponibilidade do laboratório para a realização de ensaios.

Assim como ao meu orientador o Professor Doutor Fernando Ernesto Rocha de Almeida, pela disponibilidade e orientação durante todo este trabalho.

Um especial agradecimento à minha família, mãe e pai, pelo apoio incondicional durante este percurso.

Aos meus amigos, pelo apoio e força.

À Sofia, pela incansável ajuda, paciência, e apoio.

**palavras-chave**

Brita, Gravilha, Mouquim, Britagem, Beneficiação, Crivagem, Pedreira, Sobre-Crivo, Infra-Crivo, Alimentação, Curva Granulométrica.

**resumo**

Este relatório foi realizado no âmbito do estágio curricular realizado na BRIMO - Britas de Mouquim. Tem como título “Fragmentação e Classificação na Empresa BRIMO – Quartzitos de Mouquim”.

O principal objetivo deste relatório é fazer um estudo da caracterização do processo de beneficiação, descrevendo assim o tipo de agregados produzidos, assim como o processo de modificação granulométrica, fragmentação e os vários tipos de equipamento utilizado.

Na componente laboratorial deste trabalho, foi possível realizar um estudo sobre a eficiência da crivagem, através da realização de curvas granulométricas e de partição.

**keywords**

Crushed Stone, Gravel, Mouquim, Crushing, Beneficiation, Screening, Quarry, Over-Size, Under-Size, Feed, Grading Curve.

**abstract**

The current report was carried out within the internship activities at BRIMO - Britas de Mouquim. Its title is "Fragmentation and Screening at BRIMO's Company- Mouquim's Quartzite".

The main goal of this report is to describe the characterization process of beneficiation, moreover, it is described all the kind of aggregates produced, as well as grain size changes, fragmentation and all kind of equipment.

In the laboratorial component, it was possible to accomplish an efficiency study of screening through grading curves and partition curves performance.



## Índice

1.	Introdução e Objetivos .....	1
1.1.	Considerações Iniciais.....	1
1.2.	Objetivos.....	1
1.3.	Organização do Trabalho .....	2
2.	Enquadramento Geológico.....	3
2.1.	Generalidades .....	3
2.2.	Enquadramento Morfotectónico Regional.....	6
2.2.1.	Generalidades .....	6
2.2.2.	Cristas Quartzíticas entre Caldas de S. Jorge e Arrancada do Vouga.....	7
2.2.2.1.	De Caldas de S. Jorge ao vale do rio Caima .....	9
2.2.2.2.	Do Vale do Rio Caima ao Rio Vouga .....	9
2.2.2.3.	Desde o rio Vouga até ao Norte de Águeda .....	9
2.3.	Tectonoestratigrafia .....	10
2.3.1.	Domínio estrutural de Caldas de S. Jorge – Carvoeiro .....	10
2.3.2.	Unidade de Caldas de S. Jorge.....	10
2.3.3.	Unidade do Carvoeiro.....	11
3.	Processo Produtivo – Beneficiação.....	12
3.1.	Beneficiação (Fragmentação e Classificação).....	12
3.1.1.	Fragmentação.....	13
3.1.1.1.	Britagem.....	15
3.1.1.2.	Granulação (Fragmentação Secundária) .....	19
3.1.2.	Classificação.....	21
4.	Ensaio realizado .....	29
4.1.	Ensaio das Propriedades Granulométricas dos Agregados .....	29
4.2.	Princípio.....	29
4.3.	Aparelhos e Utensílios.....	29
4.4.	Procedimento de ensaio .....	31





4.4.1.	Lavagem .....	31
4.4.2.	Peneiração .....	31
4.4.3.	Pesagem .....	32
4.4.4.	Preparação das amostras .....	33
5.	Resultados .....	37
5.1.	Curvas Granulométricas (Britagem) .....	38
5.1.1.	Curva de Partição .....	42
5.1.2.	Calibre de corte .....	46
5.2.	Curvas Granulométricas (Granulação) .....	47
6.	Conclusão .....	57
7.	Referências Bibliográficas .....	60



## Índice de Figuras

Figura 1 - Localização da área de estudo BRIMO – Britas de Mouquim - Imagem Google Maps 2014 .....	3
Figura 2 – Enquadramento morfotectónico dos alinhamentos quartzíticos da área de Caldas de S. Jorge – Carvoeiro. A) Modelo digital de terreno, do tipo relevo sombreado, gerado a partir da digitalização das curvas de nível à escala 1/50 000. B) Esboço tectónico interpretativo do domínio estrutural de Caldas de S. Jorge – Carvoeiro. Chaminé 2000 .....	5
Figura 3 - Mapa geológico regional da área entre Caldas de S. Jorge - Carvoeiro. Faixa de cisalhamento Porto – Coimbra – Tomar (CHAMINÉ et al, 2000a) .....	8
Figura 4 – Diagrama da pedreira.....	12
Figura 5 - Britador de maxilas de dois pratos. Retirado de “Tratamento de Minérios, 5ª Edição” .....	16
Figura 6 - Dumper a encher o alimentador.....	17
Figura 7 - Interior do alimentador .....	17
Figura 8 - Britador de Maxilas .....	17
Figura 9 - Interior do Britador de Maxilas .....	17
Figura 10 - a) Primeiro crivo na britagem primária; b) Saída de finos, tout-venant; c) Balastro proveniente da britagem primária .....	18
Figura 11 - Granulador Cónico .....	19
Figura 12 - Interior do Granulador Cónico .....	19
Figura 13 - Granulador cónico e seu respetivo movimento. Retirado de “Tratamento de Minérios, 5ª edição” .....	20
Figura 14 - Crivo Vibratório. Retirado de “Tratamento de Minérios, 5ª edição” .....	22
Figura 15 - Crivo vibratório usado na BRIMO.....	22



Figura 16 - Representação de um classificador espiral. Retirado de “Tratamento de Minérios, 5ª Edição” .....	24
Figura 17 - Classificador espiral usado na BRIMO.....	24
Figura 18 - Brita 45/125.....	25
Figura 19 - Gravilha 2/6.....	25
Figura 20 - Brita 11/22.....	26
Figura 21 - Brita 6/14.....	26
Figura 22 - Brita 22/45.....	27
Figura 23 - Areão 0/4.....	27
Figura 24 - Saída de finos juntamente com água .....	28
Figura 25 - Depósito de finos .....	28
Figura 26 – Peneiros .....	30
Figura 27 – Estufa Ventilada .....	30
Figura 28 - Balança digital.....	30
Figura 29 - Máquina de Peneirar.....	30
Figura 30 - Amostras a secar na estufa ventilada .....	33
Figura 31 - Amostra no balde .....	33
Figura 32 - Amostra coberta de água.....	33
Figura 33 - Amostra nos peneiros .....	34
Figura 34 - Peneiros de 63 µm e de 2 mm .....	34
Figura 35 - Finos em suspensão na água .....	35
Figura 36 - Finos depositados no fundo .....	35
Figura 37 - Amostras superiores e inferiores a 63 µm na estufa .....	36
Figura 38 - Máquina de peneirar .....	36



Figura 39 - Amostras retidas nos vários peneiros .....	36
Figura 40 - Curva granulométrica referente à Alimentação. A função teórica foi ajustada para o módulo do calibre máximo $a=58,8$ e módulo de distribuição $m=0,73$ .....	39
Figura 41 - Curva granulométrica referente ao Sobre - Crivo. A função teórica foi ajustada para o módulo do calibre máximo $a=58,8$ e módulo de distribuição $m=3$ .....	40
Figura 42 - Curva granulométrica referente ao Infra - Crivo. A função teórica foi ajustada para o módulo do calibre máximo $a=26,2$ e módulo de distribuição $m=0,80$ .....	41
Figura 43 - Curva de partição.....	44
Figura 44 - Tramo da curva de partição referente à Figura anterior (43).....	45
Figura 45 - Curva de Partição de um classificador ideal. Retirado de Leite, M.R.M.(1986) .....	46
Figura 46 - Curva granulométrica referente ao Areão 0/4 .....	48
Figura 47 - Curva granulométrica referente à Gravelha 2/6 .....	49
Figura 48 - Curva granulométrica referente à Brita 6/14 .....	50
Figura 49 - Curva granulométrica referente à Brita 11/22 .....	51
Figura 50 - Curva granulométrica referente à Brita 22/45 .....	52
Figura 51 - Curva granulométrica referente à Brita 45/125 .....	53
Figura 52 - Representação dos valores do calibre máximo(a) vs o limite superior de cada lote.....	55
Figura 53 - Representação dos valores do calibre máximo(a) vs limite superior, excepto o lote Brita 45/125.....	55



## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Classificação dos estágios de fragmentação. Retirado de M. Leite (1986).....	14
Tabela 2 - Características dos britadores primários. Adaptado de Tratamento de Minérios 5ª Edição.....	15
Tabela 3 - Características da malha usada no primeiro crivo.....	19
Tabela 4 - Malhas usadas no crivo vibratório .....	23
Tabela 5 - Fração máxima de cada peneiro .....	32
Tabela 6 - Percentagem cumulada, na Alimentação, do material retido em cada peneiro .....	38
Tabela 7 - Percentagem cumulada, no Sobre - Crivo, do material retido em cada peneiro.....	39
Tabela 8 - Percentagem cumulada, no Infra - Crivo, do material retido em cada peneiro .....	41
Tabela 9 - Dados referentes à curva de partição .....	44
Tabela 10 - Percentagem cumulada, no Areão 0/4, do material retido em cada peneiro .....	47
Tabela 11 - Percentagem cumulada, da Gravelha 2/6, do material retido em cada peneiro.....	48
Tabela 12 - Percentagem cumulada, na Brita 6/14, do material retido em cada peneiro .....	49
Tabela 13 - Percentagem cumulada, na Brita 11/22, do material retido em cada peneiro .....	50
Tabela 14 - Percentagem cumulada, na Brita 22/45, do material retido em cada peneiro .....	51
Tabela 15 - Percentagem cumulada, na Brita 45/125, do material retido em cada peneiro.....	52
Tabela 16 - Parâmetros teóricos obtidos através do ajuste de Schumann - Gaudin.....	53



## **1. Introdução e Objetivos**

### **1.1. Considerações Iniciais**

Este relatório de estágio surge no âmbito do estágio curricular para conclusão do Mestrado em Recursos Geológicos do curso de Engenharia Geológica da Universidade de Aveiro.

Este estágio foi realizado na empresa BRIMO – Britas de Mouquim que fica situada em Mouquim, Albergaria-a-Velha. Esta empresa tem como principal foco de exploração, produção e comercialização, o quartzito.

A exploração deste tipo de material é de vital importância, uma vez que abrange um vasto leque de aplicações. Desde vias de comunicação, massas betuminosas e betão. Daí ser necessário que este tipo de material tenha como principal característica, uma grande resistência, como é o caso do quartzito.

### **1.2. Objetivos**

Este relatório de estágio tem como principal objetivo descrever e caracterizar o processo de beneficiação dos agregados explorados na BRIMO. Numa primeira parte é feita uma descrição do processo produtivo, equipamento utilizado assim como o diagrama de tratamento.

Na segunda parte, que contém a componente laboratorial, é feita uma análise às curvas granulométricas obtidas. Assim como a apresentação de uma curva de partição para caracterizar o processo de crivagem.



### 1.3. Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em 7 capítulos. Esta secção do trabalho permite descrever resumidamente o tema abordado em cada capítulo.

**Primeiro capítulo - 1 Introdução e Objetivos** – Neste capítulo são descritas algumas considerações iniciais, tais como uma breve descrição do presente trabalho, as suas fases e objetivos.

**Segundo capítulo - 2 Enquadramento Geológico** – Pretende fazer uma descrição geológica e morfológica do local em estudo.

**Terceiro capítulo - 3 Processo Produtivo** - Neste capítulo são descritas as várias etapas a que são submetidos os agregados após a fase de desmonte. São descritos os processos de fragmentação e classificação, assim como o equipamento utilizado.

**Quarto capítulo - 4 Ensaaios Realizados** – Este capítulo apresenta os ensaios realizados na componente laboratorial, às amostras recolhidas. É descrita a norma usada para tratamento das amostras, assim como as várias fases até chegar à peneiração e pesagem das amostras.

**Quinto capítulo - 5 Resultados** – Aqui estão descritos os resultados obtidos, após a peneiração e pesagem das amostras. Após estes processos, foram feitas as curvas granulométricas assim como a curva de partição, que nos permitem chegar ao calibre de corte.

**Sexto capítulo - 6 Conclusão** – Neste capítulo estão descritas as conclusões obtidas com este trabalho, através dos dados obtidos pela análise granulométrica das amostras.

**Sétimo capítulo – 7 Referências Bibliográficas** – Este capítulo apresenta as referências bibliográficas usadas para este relatório.



## 2. Enquadramento Geológico

### 2.1. Generalidades

A zona estudada situa-se em Mouquim, pertence à freguesia de Valmaior no concelho de Albergaria-a-Velha. Está localizada na parte centro-norte de Portugal, a nordeste da cidade de Aveiro. Tem como coordenadas 40,42° N de latitude e 8,25°W de longitude, Figura 1.

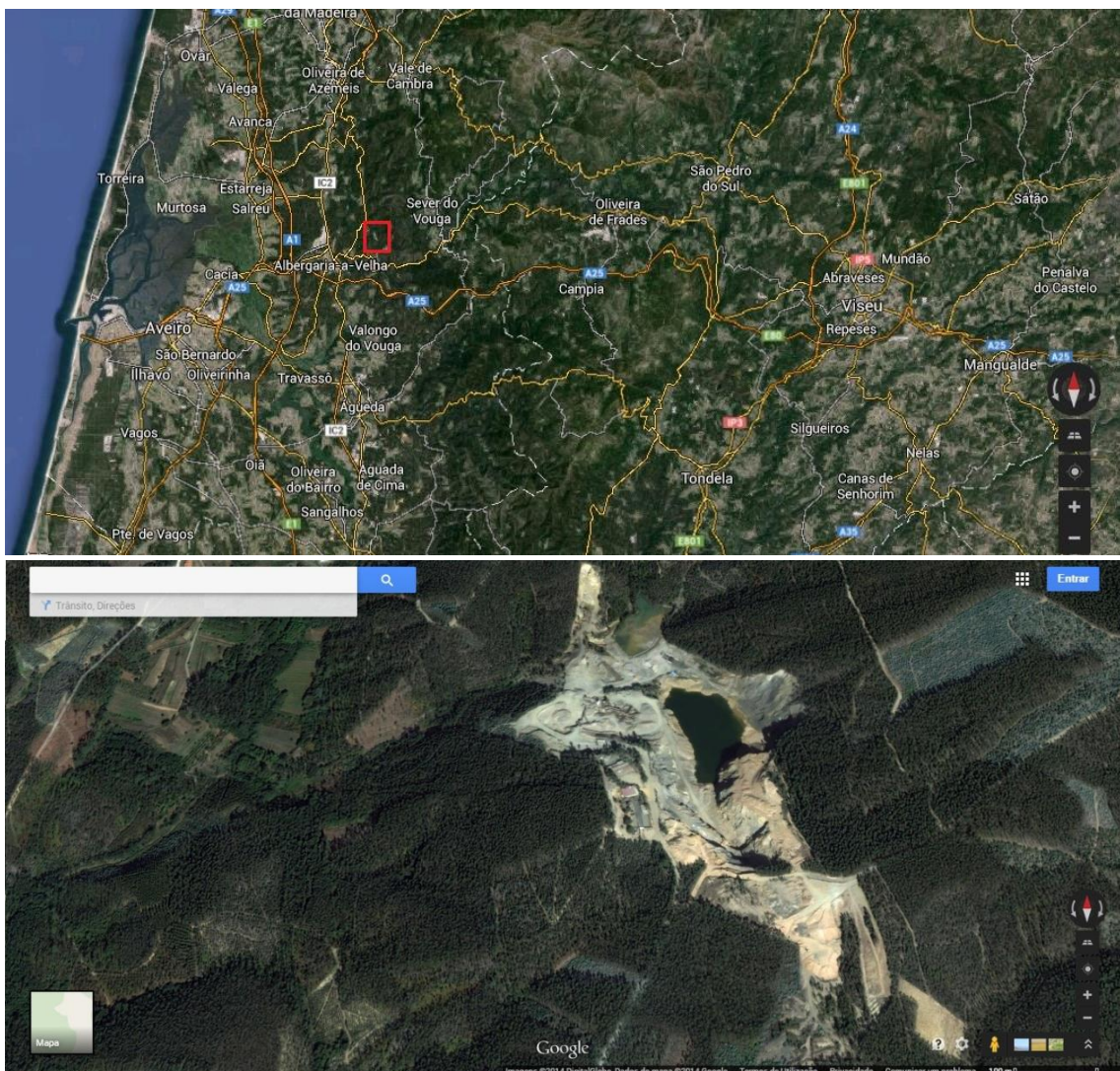


Figura 1 - Localização da área de estudo BRIMO – Britas de Mouquim - Imagem Google Maps 2014





No trabalho intitulado “*Geologia, geomorfologia e estratigrafia dos domínios estruturais de Carvoeiro - Caldas de S. Jorge e de Soutelo - Arrancada do Vouga (faixa de cisalhamento de Porto – Coimbra – Tomar, NW de Portugal)*”; Chaminé et al. (2004) encontra-se toda a informação que constitui a base da síntese que se faz neste capítulo.

A região entre Caldas de S. Jorge e Arrancada do Vouga, geologicamente está situada numa faixa metamórfica com direção NNW – SSE. E tem uma extensão desde o Porto (Foz do Douro), até Tomar. Passando por localidades como Espinho, Albergaria - a- Velha, Coimbra, Espinhal e Alvaiázere.

Esta faixa designa-se por faixa de cisalhamento de Porto - Coimbra – Tomar. Esta faixa de cisalhamento está datada do Proterozóico Médio-Superior, e faz parte do Terreno Autóctone Ibérico pertencendo maioritariamente à Zona de Ossa Morena (ZOM). A oriente contacta a Zona Centro Ibérica (ZCI) da Cadeia Varisca Ibérica, através da Faixa Blastomilonítica de Oliveira de Azeméis.

Grande parte desta região possui uma grande zona ocupada por depósitos de cobertura (aluviões, areias de praia) de idade holocénica e/ou plistocénica. Nomeadamente entre a zona Sul de Vila Nova de Gaia e Aveiro. O restante da área está ocupado por depósitos sedimentares de idade Plio – Plistocénica, Figura 2.

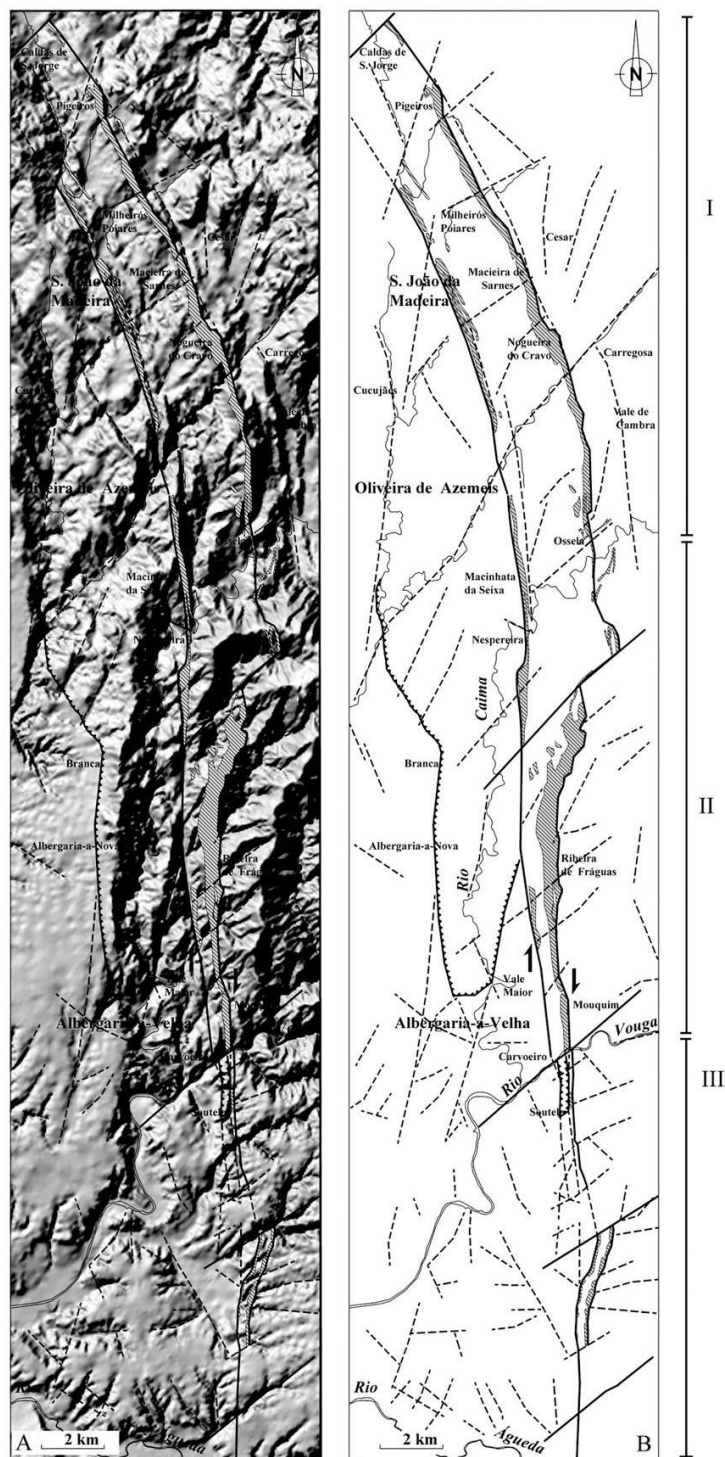


Figura 2 – Enquadramento morfotectónico dos alinhamentos quartzíticos da área de Caldas de S. Jorge – Carvoeiro. A) Modelo digital de terreno, do tipo relevo sombreado, gerado a partir da digitalização das curvas de nível à escala 1/50 000. B) Esboço tectónico interpretativo do domínio estrutural de Caldas de S. Jorge – Carvoeiro. Chaminé 2000



## **2.2. Enquadramento Morfotectónico Regional**

### **2.2.1. Generalidades**

A região que se encontra emersa desde o Porto - Albergaria-a-Velha - Águeda corresponde a uma plataforma litoral plana que vai de encontro a um relevo acentuado. Não excedendo os 170 m de altitude, o topo da plataforma litoral a norte do rio Vouga é bem marcado e sinuoso com direção NNW – SSE. Apresenta fracos declives a suaves pelo menos até Oliveira de Azeméis.

Os relevos predominantes na plataforma litoral, apresentam um nível de erosão pouco acentuado. A Leste do rebordo interior da plataforma o relevo apresenta colinas formadas por rochas quartzíticas e metassedimentares orientadas de NNW – SSE. Entre as colinas encontram-se lateralmente definidas áreas deprimidas orientadas com a mesma direção. Tipologicamente estas colinas encontram-se dominadas por alvéolos, resultado de alteração diferencial. No lado oriental dos relevos, situa-se o maciço da Gralheira e a serra do Arestal. Originando assim um complexo de elevações entre os rios Douro – Paiva e Vouga – Sul, variando as cotas entre os 1100 m e os 750 m.

A rede de drenagem demonstra a tectónica da área, refletindo os traços morfoestruturais da região, em especial o sistema de fraturação regional. A distribuição das linhas de água é condicionada por uma compartimentação tectónica produzida pela fraturação. Por norma as redes hidrográficas são do tipo retangulares ou dendríticas.

Os rios Douro, Vouga e Águeda são os principais rios da rede hidrográfica, e colocam um limite na zona estudada, a norte e a sul da região. As linhas de água de segunda ordem apresentam uma direção NE – SW, sendo que as nascentes destas ribeiras coincidem com os limites entre a plataforma litoral e o rebordo interior da plataforma.



### **2.2.2. Cristas Quartzíticas entre Caldas de S. Jorge e Arrancada do Vouga**

A zona da faixa entre Caldas de S. Jorge e Carvoeiro, possui importantes afloramentos quartzíticos necessários de serem estudados. Estes afloramentos quartzíticos entre as Caldas de S. Jorge e Arrancada do Vouga, constituem dois alinhamentos topográficos descontínuos como é mostrado na Figura 3. Possuem orientação meridiana desde as Caldas de S. Jorge até ao Carvoeiro dando origem a uma estrutura sinforma, a de Caldas de S. Jorge – Carvoeiro. Estrutura esta que define a faixa de Cisalhamento de Porto – Albergaria-a-Velha.

A sua Geologia é composta através do contacto mecânico entre unidades da Zona de Ossa Morena (ZOM) com as unidades da Zona Centro Ibérica (ZCI) do Paleozóico inferior – Lado oeste da Faixa de Cisalhamento de Porto – Albergaria-a-Velha. E pelo contacto tectónico entre unidades do Paleozóico inferior e do Complexo Xisto - Grauváquico (CXG) – Lado Este da faixa de Cisalhamento.

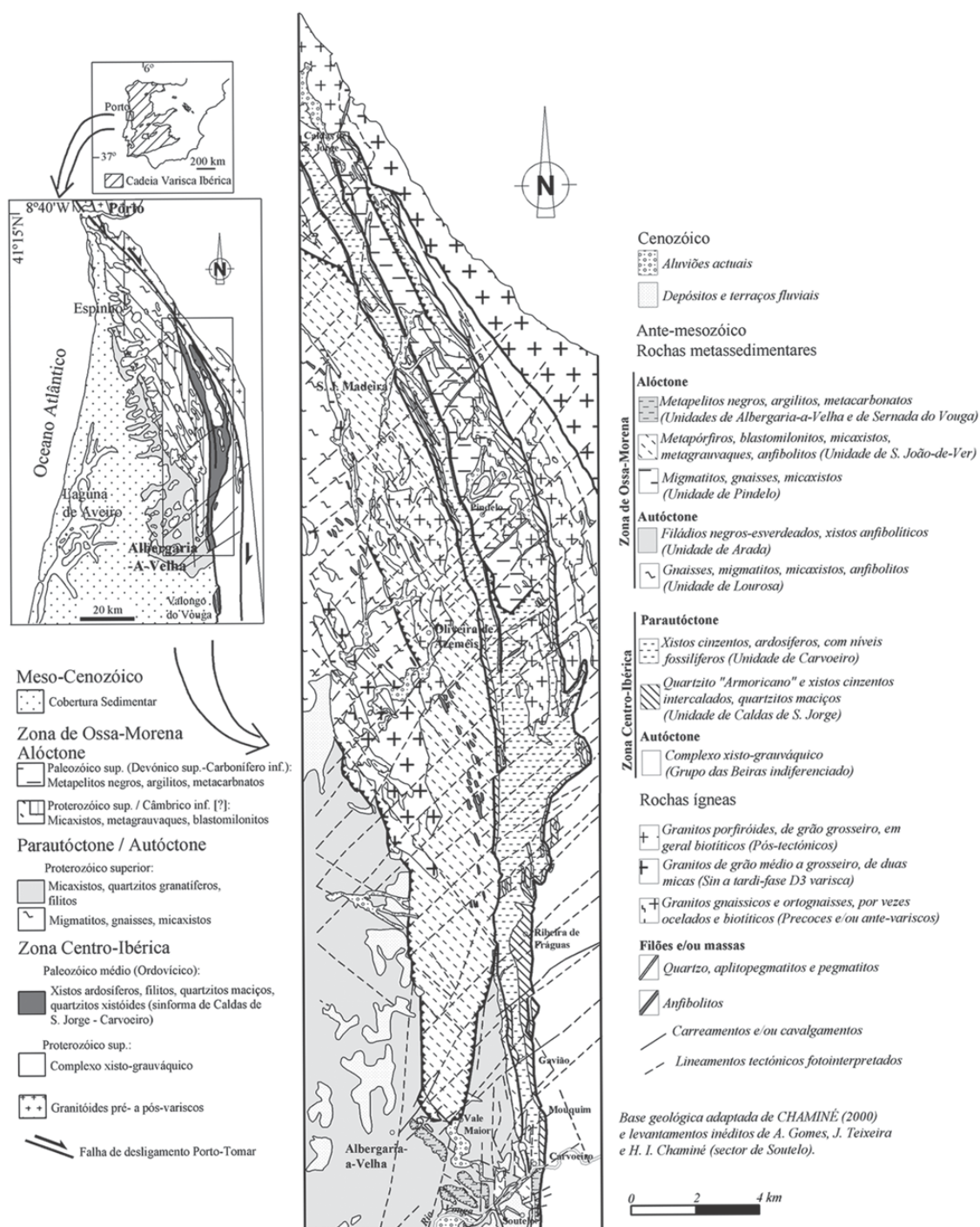


Figura 3 - Mapa geológico regional da área entre Caldas de S. Jorge - Carvoeiro. Faixa de cisalhamento Porto – Coimbra – Tomar (CHAMINÉ et al, 2000a)



No que diz respeito à morfologia das cristas quartzíticas, estas parecem estar relacionada com a proximidade em relação à zona de cisalhamento principal. Tendo em conta o afastamento entre as cristas quartzíticas, e a sua continuidade/interrupção e morfologia, definem-se três tipos de compartimentos regionais:

#### **2.2.2.1. De Caldas de S. Jorge ao vale do rio Caima**

Existem dois alinhamentos quartzíticos, paralelos e bem definidos quer topograficamente, quer litologicamente. No entanto o ramo que se encontra mais a oeste é mais expressivo, morfologicamente. Estas cristas estão distanciadas de aproximadamente 2Km. Os cursos de água apresentam uma maior dificuldade em passar o ramo Oeste das cristas quartzíticas, isto mostra uma maior possança deste alinhamento.

#### **2.2.2.2. Do Vale do Rio Caima ao Rio Vouga**

Nesta secção da região, as cristas quartzíticas vão estreitando e perdendo a definição, o ramo mais a este encontra-se melhor preservado. O enquadramento morfotectónico da crista Oeste aparece em um único ramo, que aparece logo abaixo de Ribeira de Fráguas. Nesta zona existe um basculamento geral a tender para Sul, sendo este interrompido por falhas orientadas de NE - SW. Estas falhas favorecem nomeadamente a passagem do rio Fílvida e do rio Vouga.

Entre Ribeira de Fráguas e o rio Vouga há um aproximar das cristas quartzíticas, formando desta forma uma barreira à erosão. Aqui os quartzitos são intersectados por cursos de água a cotas de cerca de 90 a 100 m.

#### **2.2.2.3. Desde o rio Vouga até ao Norte de Águeda**

Existe uma série de afloramentos descontínuos, e de pouca expressão morfológica, nesta região estes afloramentos são pouco elevados, chegando a atingir os 100 m de altitude. As cristas quartzíticas aqui contidas são de altura



reduzida, não chegando a atingir os 100 m, no ramo oriental. Os materiais quartzíticos aqui representados apresentam uma deformação bastante acentuada.

### **2.3. Tectonoestratigrafia**

#### **2.3.1. Domínio estrutural de Caldas de S. Jorge – Carvoeiro**

As unidades de Carvoeiro e de Caldas de S. Jorge são as únicas que contactam as unidades da Zona de Ossa Morena. Nomeadamente as unidades de Lourosa, Arada e Albergaria - a - Velha.

Há uma faixa de rochas quartzíticas que se desenvolve a leste de Albergaria - a - Velha e Lourosa do tipo “Quartzito Armoricano” e de xistos ardosíferos e filitos com uma extensão de aproximadamente 35 Km e orientados de N – S, desde Caldas de S. Jorge até ao Carvoeiro. Estes afloramentos tinham sido designados anteriormente por “Ordovício de entre Carvoeiro (Vouga) a Caldas de S. Jorge”, e como sinforma do Carvoeiro.

#### **2.3.2. Unidade de Caldas de S. Jorge**

Esta unidade apresenta quartzitos com uma tonalidade clara, com algumas intercalações xistentas. Por norma ocorrem próximo do contacto com os xistos ardosíferos e com filitos. O alinhamento quartzítico do lado oriental, apresenta sobre a parte mais a oeste xistos ardosíferos acinzentados. E sobre a parte mais a leste apresenta o Complexo Xisto Grauváquico (CXG).

Estes quartzitos encontram-se bastante deformados. Apresentam uma estrutura sinforma deitada, ligeiramente mergulhante para Oeste. É de realçar que no passado já tinha sido feita uma referência ao afloramento do Paleozóico inferior a Leste de Albergaria-a-Velha (Mouquim - Carvoeiro) como um sinclinal com direção N-S. Desta forma o alinhamento quartzítico ocidental prolonga-se desde as Caldas de S. Jorge até Gavião (Albergaria-a-Velha), enquanto o



alinhamento oriental tem uma extensão que vai desde as Caldas de S. Jorge até ao Carvoeiro.

### **2.3.3. Unidade do Carvoeiro**

Os xistos ardosíferos apresentam geralmente uma cor que vai de escura até negra. Podendo apresentar uma tonalidade mais clara devida à ocorrência de intercalações finas de siltíticas. Próximo dos acidentes cavalgantes as rochas apresentam-se muito deformadas chegando a apresentar-se como filonitos de cor escura. E correspondem a corredores de deformação da faixa de cizalhamento de Porto – Albergaria-a-Velha - Coimbra.

No meio dos xistos ardosíferos existem rochas com alto grau de metamorfismo, correspondentes à unidade do Pindelo, esta da ZOM. Os xistos da unidade do Carvoeiro apresentam uma extensão entre os alinhamentos quartzíticos, tendo sido incluídos nos “Xisto das Beiras” ou “Complexo Xisto Grauváquico”.

Os limites geológicos dos xistos ardosíferos são o quartzito “Armoricano”, quer a leste quer a oeste. Sendo a norte limitados pelos metamorfitos de alto grau da Unidade da Lourosa (ZOM).

A sul, os xistos terminam ao encontrar o rio Vouga, aflorando numa estreita faixa perto das localidades de Mouquim e de Carvoeiro (Albergaria-a-Velha).





### 3. Processo Produtivo – Beneficiação

O processo produtivo contempla várias fases que vão desde, a extração, britagem e crivagem, até à obtenção do produto final.

Este capítulo retrata as fases de fragmentação e classificação, assim como os vários tipos de equipamento usado e respetivos diagramas de tratamento, trata-se do processo de beneficiação.

#### 3.1. Beneficiação (Fragmentação e Classificação)

A beneficiação de minérios consiste num conjunto de operações que visa a modificação da granulometria, forma ou a concentração das espécies minerais presentes. Contudo, este processo não pode trazer qualquer modificação a nível químico. Na figura 4 o diagrama de tratamento, mostra as várias etapas para o processo de beneficiação utilizado na BRIMO.

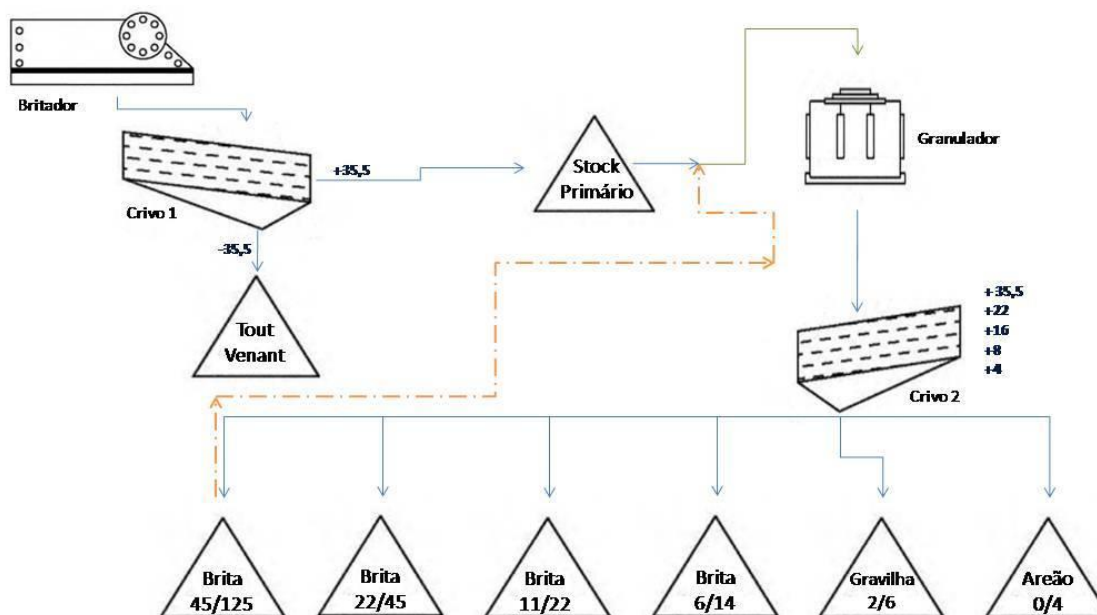


Figura 4 – Diagrama da pedra



### 3.1.1. Fragmentação

A fragmentação consiste num conjunto de técnicas que tem por finalidade reduzir um sólido de determinado tamanho em fragmentos de tamanho menor, esta redução é feita por ação mecânica. A fragmentação de um material homogéneo, é feita até atingir o tamanho ideal consoante a sua aplicação final. Durante o processo de lavra, é possível considerar como a primeira etapa no processo de fragmentação. Uma vez que há a produção em blocos através do arranque por explosivos. Estes blocos vão ser posteriormente inseridos no alimentador para iniciar o processo de britagem.

A fase de fragmentação tem como principais objetivos:

- Produzir lotes de partículas para utilização imediata.
- Produzir partículas de calibres mais adequados ao transporte ou para o tratamento em outros equipamentos.

A redução de calibre no processo de fragmentação é feita através de 3 estágios:

- **Britagem** ou fragmentação primária.
- **Granulação** ou fragmentação secundária.
- **Moagem** ou fragmentação terciária (Este processo geralmente não é realizado nas pedreiras).

A britagem é o conjunto de processos que objetiva a fragmentação de blocos provenientes do desmonte, alterando a sua granulometria. Nesta fase o principal objectivo é produzir partículas de dimensão mais reduzida, dando assim origem às britas.



Após o processo da britagem, as britas são fragmentadas em granuladores, produzindo assim as chamadas granalhas.

A britagem é um estágio no processamento de rochas industriais, que utiliza equipamentos apropriados para a redução de tamanhos convenientes.

A fragmentação pode ser aplicada a rochas com tamanhos desde 1000 mm até 10 mm. Esta operação é feita dentro dos estágios convenientes, desta forma a fragmentação desenvolve-se por meio dos três estágios, referidos anteriormente. As fases de fragmentação e respectivas classes dimensionais estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos estágios de fragmentação. Retirado de M. Leite (1986)

<b>Fases de Fragmentação e classes dimensionais</b>	
<b>Grandes blocos</b>	1000 / 250 mm
<b>Blocos</b>	250 / 70 mm
<b>Britagem</b>	
<b>Britas graúdas</b>	70 / 40 mm
<b>Britas miúdas</b>	40 / 20 mm
<b>Granulação</b>	
<b>Granalhas graúdas</b>	20 / 10 mm
<b>Granalhas miúdas</b>	10 / 5 mm
<b>Moagem</b>	
<b>Areias grossas</b>	5 / 2 mm
<b>Areias finas</b>	2 / 0.2 mm
<b>Lamas</b>	< 0.2 mm

Na Brimo – Britas de Mouquim a fragmentação é realizada através de dois estágios:

- Britagem
- Granulação



### 3.1.1.1. Britagem

Os britadores empregados são os de grande porte e sempre operam em circuito aberto. A britagem é realizada a seco. A Tabela 2 apresenta algumas das características destes britadores.

Tabela 2 - Características dos britadores primários. Adaptado de Tratamento de Minérios 5ª Edição

Características Consideráveis		Britador de Maxilas
Capacidade	Boa	Para capacidades médias e baixas (100 t/h).
Granulometria do produto	Recomendado	Quando a quantidade de finos é indesejável. O <i>top size</i> é alto para materiais lamelares.
Características Mecânicas das Rochas	Sem restrição	
Estratificação da Rocha	Pouco adequado	Para materiais que tenham tendência a produzir partículas lamelares.
Materiais Húmidos com Alto Teor de Argila	Adequado	Mais que o giratório; Menos que o impacto de rolo dentado.
Teor de Minerais Abrasivos Altos	Adequado	Quando o material é abrasivo.
Grau de Redução. Valores médios usuais	Em torno de 5:1	
Modo de Alimentação	É necessário Alimentador	
Granulometria do Produto	Caracterizado por ter alta produção de finos.	



Na BRIMO – Britas de Mouquim a britagem primária é feita por um conjunto Lokomo C100, constituído por alimentador, britador de maxilas de dois pratos, tipo Blake (Figura 5), crivo e telas.

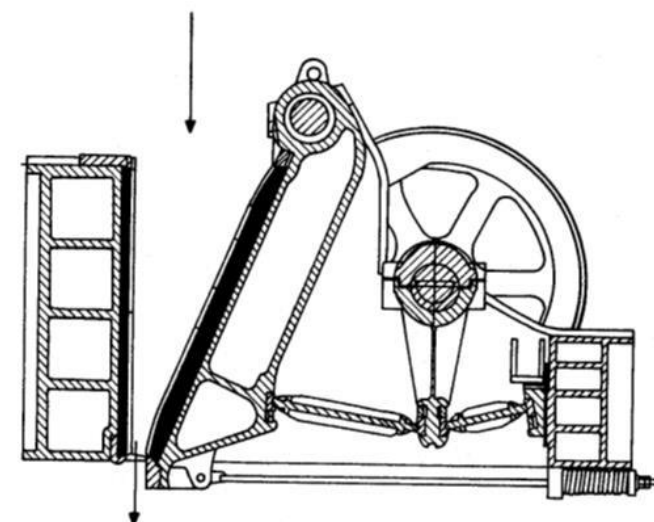


Figura 5 - Britador de maxilas de dois pratos. Retirado de “Tratamento de Minérios, 5ª Edição”

Neste tipo de britador, de dois pratos tipo Blake, a maxila móvel tem um movimento pendular. São destinados a fragmentar material mais duro, de difícil fragmentação. A granulometria do produto é estabelecida através do ajuste da descarga, sendo então definida a relação de redução.

Este tipo de britador é utilizado na britagem primária em blocos de elevadas dimensões/dureza ou com grandes variações de tamanho na alimentação. Este equipamento é composto por uma maxila fixa e outra móvel ligada ao excêntrico que origina o movimento de aproximação e afastamento entre elas. O bloco após entrar na boca do alimentador vai descendo entre as maxilas e recebe o impacto que vai dar origem à fragmentação.

A Figura 6 mostra um Dumper a colocar material no alimentador usado na BRIMO – Britas de Mouquim e a Figura 7 mostra o interior do alimentador. A Figura 8 mostra o britador de maxilas usado na pedreira, dando assim início ao processo da britagem primária, a Figura 9 mostra o interior do britador primário.



Figura 6 - Dumper a encher o alimentador



Figura 7 - Interior do alimentador



Figura 8 - Britador de Maxilas



Figura 9 - Interior do Britador de Maxilas

Na BRIMO – Britas de Mouquim após o processo de britagem, é obtido material de vários tamanhos. Na britagem, Figura 10, temos a saída de finos após passar pelo primeiro crivo a), que são misturados com brita 11/22 produzindo assim tout-venant, b). Para além dos finos temos a saída de material mais grosseiro designado de balastro, c). Aqui encontra-se o stock intermédio que estabelece a ligação entre o conjunto de britagem e o conjunto de granulação.



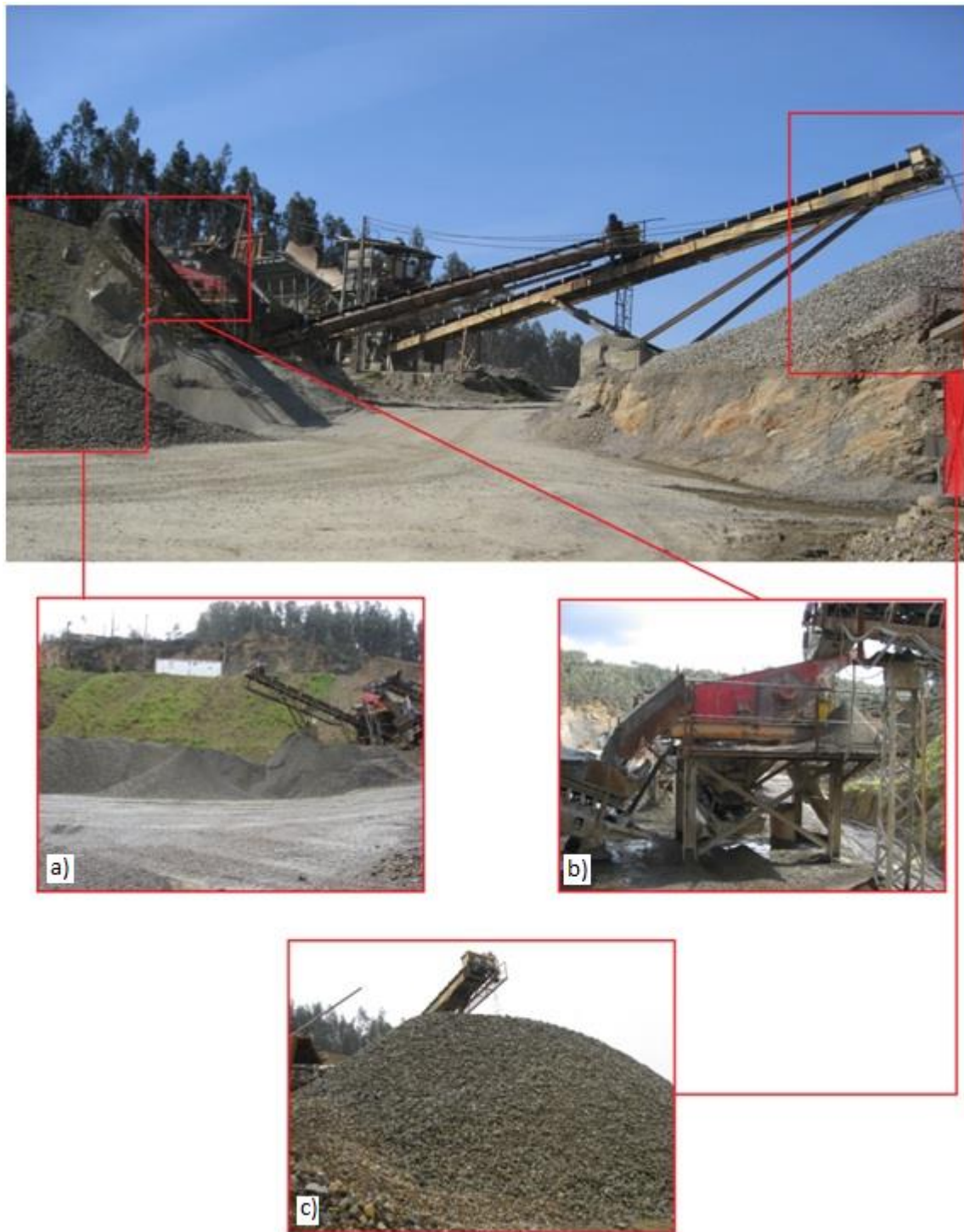


Figura 10 - a) Saída de finos, tout-venant; b) Primeiro crivo na britagem primária; c) Balastro proveniente da britagem primária.



Na Tabela 3 estão os dados referentes à malha usada no primeiro crivo, Figura 10 a), da britagem.

Tabela 3 - Características da malha usada no primeiro crivo

<b>Largura</b>	<b>1,20 m</b>
<b>Comprimento</b>	1,55 m
<b>Malha/Luz</b>	35,5 mm
<b>Diâmetro do ferro da malha</b>	8 mm

#### 3.1.1.2. Granulação (Fragmentação Secundária)

A granulação é realizada após o material processado ter passado pela britagem. Tem como objetivo na maioria dos casos a redução granulométrica do material para a moagem ou o melhoramento na forma do material, que é o caso na BRIMO.

Nesta empresa a britagem secundária é feita recorrendo a um conjunto Sandvik H3000 constituído por um granulador cónico (Figura 11), crivos e telas num circuito com carga circulante. A Figura 12 mostra o interior do granulador.



Figura 11 - Granulador Cónico



Figura 12 - Interior do Granulador Cónico





O material resultante da britagem, empilhado no stock intermédio, chega até ao granulador caindo numa tela transportadora. Esta pilha tem na sua base uma comporta, que abre e fecha consoante a necessidade de material a transportar até ao granulador.

O princípio de funcionamento deste granulador consta do movimento de aproximação e afastamento do cone central em relação à carcaça invertida, Figura 13.

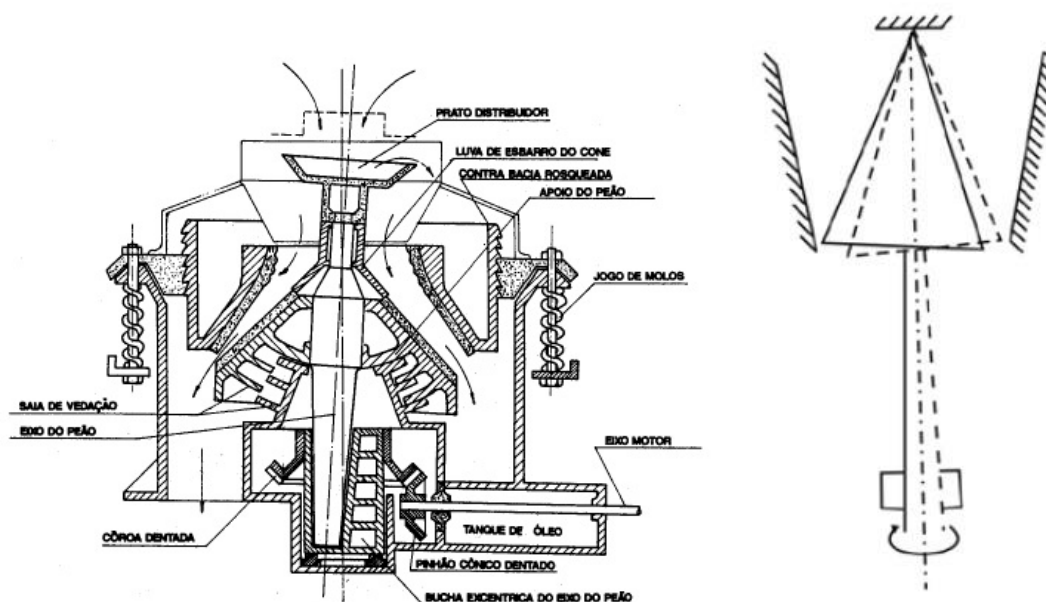


Figura 13 - Granulador cónico e seu respetivo movimento. Retirado de “Tratamento de Minérios, 5ª edição”



### 3.1.2. Classificação

A classificação tem como principal objetivo, a separação do material obtido em duas ou mais frações com tamanhos distintos.

Este processo consiste numa separação segundo a granulometria das partículas. O material é separado em duas ou mais classes, sendo uma limitada inferiormente e outra superiormente. O material retido no crivo é designado de sobre - crivo (*oversize*), enquanto o material que passa é designado de infra - crivo (*undersize*).

A crivagem pode ser de dois tipos:

- Crivagem a húmido
- Crivagem a seco

Na crivagem a húmido, é adicionada água ao material que vai ser peneirado para facilitar a passagem dos finos na malha do crivo. Este tipo de crivagem é aplicado a material de até 0,4 mm.

Na crivagem a seco o material é simplesmente peneirado sem recurso a água. Geralmente a fração pode ir até aos 6mm, entretanto com alguma eficiência, pode ir até aos 1,7 mm.

Este processo, crivagem, é feito através do uso do crivo vibratório. Este tipo de equipamento possui várias redes de crivagem inclinadas com malha variável. E são caracterizadas por impulsos rápidos de pequena amplitude produzidos por meio elétrico, Figura 14. A Figura 15 mostra o crivo vibratório usada na BRIMO.

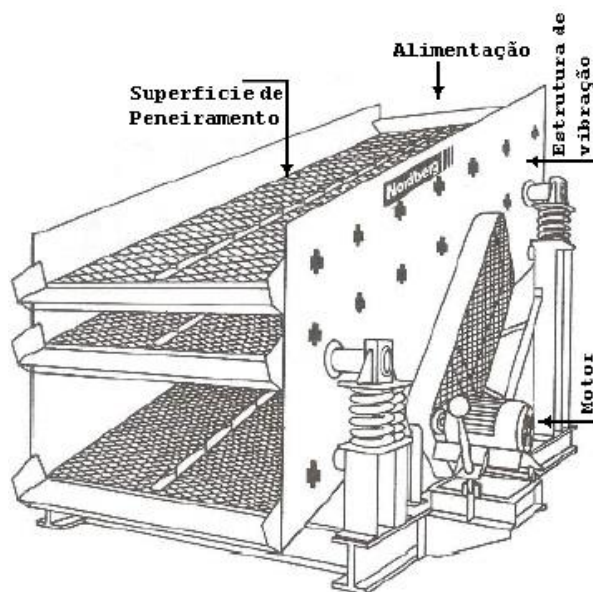


Figura 14 - Crivo Vibratório. Retirado de  
"Tratamento de Minérios, 5ª edição"



Figura 15 - Crivo vibratório usado na BRIMO



Na Tabela 4 estão descritas as medidas das malhas usadas no crivo vibratório.

Tabela 4 - Malhas usadas no crivo vibratório

	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4
<b>Comprimento</b>	1,25 m	1,25 m	1,25 m	1,25 m
<b>Largura</b>	1,96 m	1,96 m	1,96 m	1,96 m
<b>Malha/Luz</b>	35,5 mm	22 mm	16 mm	8 mm
<b>Diâmetro do ferro usado na malha</b>	8 mm	6 mm	5 mm	3,15 mm

Para além destas quatro malhas, há uma quinta malha feita de borracha por onde passa o material mais fino juntamente com água. O material que passa nesta malha segue para um classificador espiral para retirar as areias (Areão 0/4). As granulometrias abaixo seguem, juntamente com água, para um depósito de finos.

O classificador espiral, Figura 16, consiste em uma calha onde dentro dela encontra-se um eixo envolvido por hélices. Estas hélices ao girar mantêm a polpa em suspensão, e têm a função de remover o material sedimentado do fundo da calha. O classificador espiral é geralmente caracterizado pelo diâmetro da espiral.

Para se obter uma classificação mais fina a velocidade de revolvimento deve ser pequena e a inclinação da calha a menor possível. Obtendo assim um tanque de sedimentação com maior volume, o que permite um tempo de sedimentação maior.

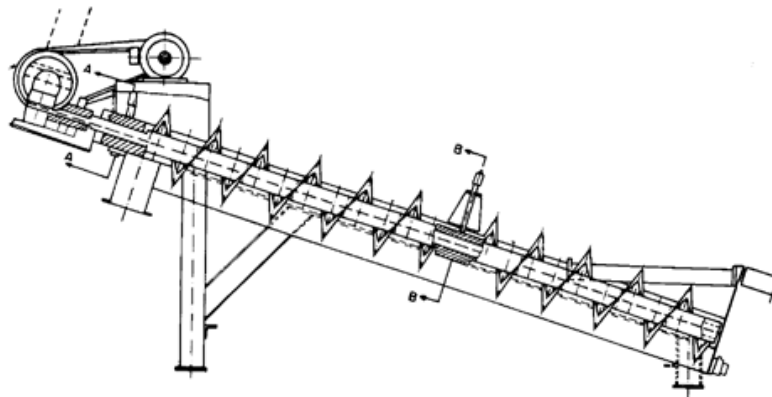


Figura 16 - Representação de um classificador espiral. Retirado de "Tratamento de Minérios, 5ª Edição"

A Figura 17 representa o classificador espiral utilizado na BRIMO.



Figura 17 - Classificador espiral usado na BRIMO

Nesta fase final de crivagem, o material segue através da tela transportadora, vindo do granulador até ao crivo vibratório. Após o material passar pelo crivo, é obtido material com 6 granulometrias diferentes. Figura 18 - Brita 45/125; Figura 19 - Gravelha 2/6; Figura 20 - Brita 11/22; Figura 21 - Brita 6/14; Figura 22 - Brita 22/45; Figura 23 - Areão 0/4.





Figura 18 - Brita 45/125



Figura 19 - Gravelha 2/6



Figura 20 - Brita 11/22



Figura 21 - Brita 6/14





Figura 22 - Brita 22/45



Figura 23 - Areão 0/4





Na granulação, ou britagem secundária, a brita 45/125 pode ser encaminhada de duas formas. Podendo ir para o stock como mostra a Figura 18, ou quando o material com estas dimensões não é necessário, faz de carga circulante e volta a entrar no granulador cônico. Voltando outra vez ao processo de granulação, até conseguir tamanhos mais reduzidos, Figura 11.

Após o material passar pela última malha de borracha, o material em questão (finos) juntamente com água, segue para a barragem de finos. Esta situada a uma certa distância do crivo. Sendo o deslocamento feito através de tubos subterrâneos. Figuras 24 e 25.



Figura 24 - Saída de finos juntamente com água



Figura 25 - Depósito de finos



## **4. Ensaaios realizados**

### **4.1. Ensaio das Propriedades Granulométricas dos Agregados**

Este ensaio das propriedades granulométricas dos agregados, é realizado usando a norma NP EN 933-1. Esta norma descreve o método de peneiração, para chegar à análise granulométrica.

### **4.2. Princípio**

Este ensaio consiste em separar um material em várias classes granulométricas com granulometria decrescente. Esta separação é feita usando um conjunto de peneiros. A dimensão das aberturas são selecionadas de acordo com a precisão exigida, assim como o número de peneiros a utilizar.

A peneiração é o método usado, recorrendo à lavagem do provete seguido de peneiração a seco. Se a lavagem alterar as características físicas de um agregado, é necessário recorrer à peneiração a seco.

A massa das partículas retida nos diversos peneiros é relacionada com a massa inicial do material. As percentagens cumulativas que passam em cada peneiro são apresentadas sob a forma numérica, e quando necessário graficamente.

### **4.3. Aparelhos e Utensílios**

Segue uma lista do material usado para fazer o ensaio das propriedades granulométricas:

- Peneiros, Figura 26.
- Estufa ventilada, Figura 27.
- Balança, Figura 28.
- Equipamento de lavagem
- Tabuleiros e escovas
- Máquina de peneirar, Figura 29.



Figura 26 – Peneiros



Figura 27 – Estufa Ventilada

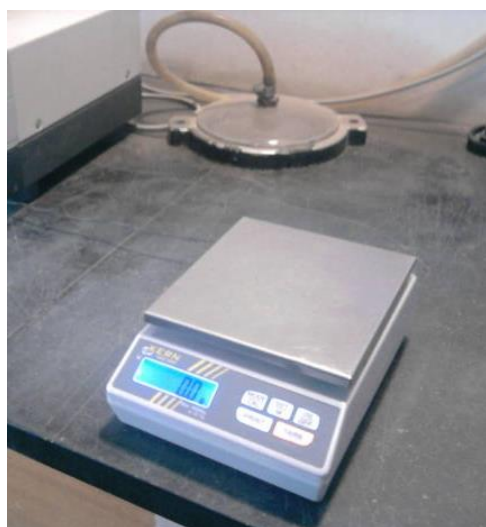


Figura 29 - Balança digital



Figura 28 - Máquina de Peneirar



#### **4.4. Procedimento de ensaio**

##### **4.4.1. Lavagem**

Após secar e pesar o provete de ensaio, este é colocado num recipiente, e de seguida é imerso em água. Agita-se o provete para obter a separação completa e suspensão dos finos. Molha-se o peneiro de 63 µm em ambos os lados e coloca-se por cima um peneiro de proteção (1 mm ou 2 mm). Despeja-se o provete de ensaio no peneiro superior. Continua-se a lavagem até que a água que atravessa o peneiro de 63 µm seja límpida.

##### **4.4.2. Peneiração**

Despeja-se o material lavado e seco na coluna de peneiros. A coluna de peneiros é constituída por um certo número de peneiros encaixados e dispostos por ordem decrescente da dimensão das aberturas.

Agita-se a coluna de peneiros retirando posteriormente os peneiros um a um, começando pelo de maior abertura e agita-se cada peneiro manualmente garantindo que não haja perda de material, para isso é necessário usar tampa e fundo na coluna de peneiros.

Para evitar a sobrecarga dos peneiros, a fração retida sobre cada peneiro, no fim não deverá ultrapassar:

$$\frac{A * \sqrt{d}}{200}$$

Onde:

A - é a área do peneiro em milímetros quadrados.

d - é a dimensão das aberturas do peneiro em milímetros.

A Tabela 5 resume a fração máxima retida, que cada peneiro pode conter, para que não ocorra sobrecarga dos mesmos.



Tabela 5 - Fração máxima de cada peneiro

Fração máxima retida em cada peneiro (g)		
Peneiro (mm)	Raio (mm)	Fração Retida (g)
0,063	190	142,26
0,125	190	200,38
0,25	190	283,39
0,5	190	400,77
1	190	566,77
2	190	801,53
4	190	1133,54
6,3	190	1422,58
12,5	190	2003,83
19	190	2470,49
37	190	3447,53
63	190	4498,60
75	190	4908,37

#### 4.4.3. Pesagem

O material retido nos peneiros é posteriormente pesado com o recurso a uma balança. O material com maior granulometria é pesado, depois efetuar a mesma operação para os peneiros seguintes, pesando as respetivas massas.



#### 4.4.4. Preparação das amostras

Após a amostras serem recolhidas no campo, estas são postas a secar a cerca de 100°, Figura 30. Após a amostras estarem secas, é necessário deixar arrefecer e de seguida pesadas na balança. O seu peso é registado.

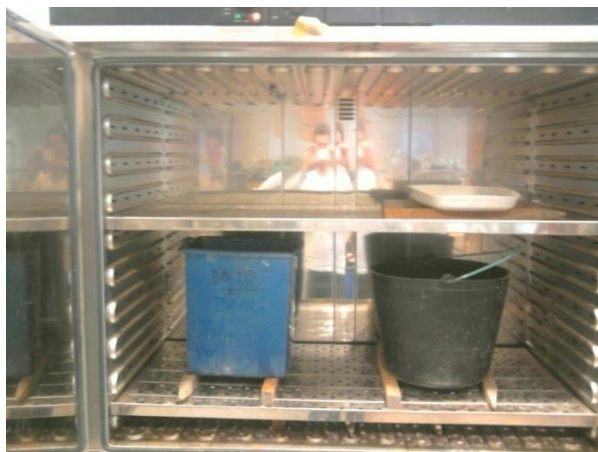


Figura 30 - Amostras a secar na estufa ventilada

O processo seguinte é o de lavagem das amostras. Aqui, para além das amostras serem lavadas, também vão ser separadas em amostras com granulometria  $<63\ \mu\text{m}$  e  $>63\ \mu\text{m}$ . Estas são colocadas em um recipiente, Figura 31, e de seguida são cobertas com água, Figura 32. É necessário de vez em quando ir agitando o provete para colocar os finos em suspensão.



Figura 32 - Amostra no balde



Figura 31 - Amostra coberta de água





De seguida as amostras do balde foram peneiradas pela primeira vez. Esta fase inicial, tem por objetivo fazer uma primeira separação, entre o material mais fino ( $<63\ \mu\text{m}$ ), e o material de granulometria superior ( $> 63\ \mu\text{m}$ ).

Foram usados neste processo dois peneiros, de  $63\ \mu\text{m}$  e de  $2\text{mm}$ , este último para proteção, Figura 34. O material é colocado nos peneiros que ficam sobre um funil, estando este funil dentro de um balde, Figura 33. É colocada água para facilitar a peneiração.



Figura 33 - Amostra nos peneiros



Figura 34 - Peneiros de  $63\ \mu\text{m}$  e de  $2\text{mm}$

O material que fica retido nos peneiros é colocado num tabuleiro. Uma vez que os finos se encontram em suspensão na água, Figura 35, é necessário após este processo estar concluído, colocar no balde com as amostras  $<63\ \mu\text{m}$  umas gotas de água do mar, Figura 36. Isto para facilitar o depósito dos finos no fundo do balde.

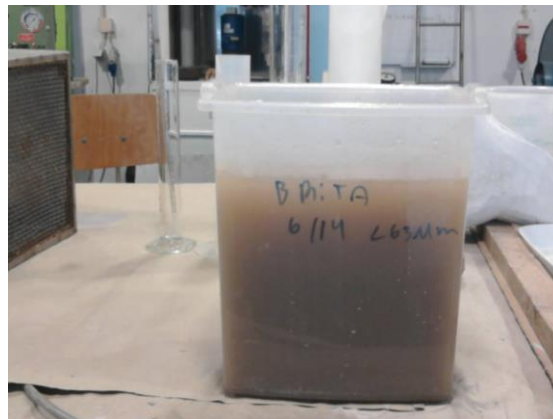


Figura 35 - Finos em suspensão na água

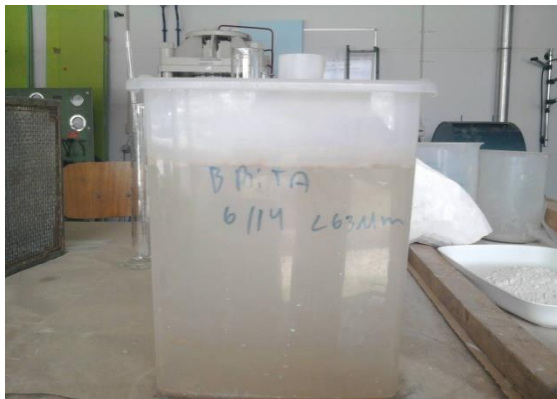


Figura 36 - Finos depositados no fundo

Após a água encontrar-se limpa, foi retirada com a ajuda de uma mangueira. Até ficarem só os finos no fundo. De seguida todas as amostras foram para a estufa, Figura 37, as amostras superiores e inferiores a  $63\ \mu\text{m}$ .





Figura 37 - Amostras superiores e inferiores a 63  $\mu$ m na estufa

Após as amostras estarem secas foram levadas à máquina de peneirar, Figura 38. A coluna de peneiros inclui os peneiros com as seguintes aberturas: 37,5 mm, 19 mm, 12,5 mm, 6,3 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,250 mm, 0,125 mm e 63  $\mu$ m. Na Figura 39 podemos ver algumas amostras retidas nos peneiros, após serem retiradas da máquina de peneirar.



Figura 38 - Máquina de peneirar



Figura 39 - Amostras retidas nos vários peneiros

De seguida as amostras foram pesadas e registados os respetivos valores.



## 5. Resultados

Este capítulo tem por finalidade apresentar os resultados obtidos na fase de laboratório, descrita no capítulo anterior. Com base nestes dados é possível estudar a eficiência da crivagem, através da curva de partição e o calibre de corte no conjunto de britagem.

Para chegar à curva de partição é necessário obter primeiramente as curvas granulométricas das amostras estudadas referentes à Alimentação, Sobre-Crivo e Infra-Crivo.

O ajuste das curvas granulométricas foi obtido através da função teórica Shumann-Gaudin. Esta função tende a descrever a distribuição de calibres dentro de um lote de partículas, ajustando melhor no tramo dos finos. É dada pela equação:

$$wt = 100 * (x/a)^m$$

Onde:

$wt$  – cumulante inferior - % em peso que atravessa a luz  $x$ ;

$wr$  – cumulante superior - % em peso retida na luz  $x$ ;

$a$  – módulo de calibre;

$m$  – módulo de distribuição;

A constante  $m$  refere-se ao valor do coeficiente angular (módulo de distribuição) da curva respetiva, medindo assim a dispersão da distribuição. Quanto menor for o valor deste módulo, maior é a dispersão e vice-versa.

Por sua vez o valor do módulo de calibre,  $a$ , é referente ao calibre máximo do lote.

Este ajuste de Schumann – Gaudin foi efectuado através da ferramenta Solver.



### 5.1. Curvas Granulométricas (Britagem)

A Tabela 6 mostra a percentagem cumulada na Alimentação do material retido em cada peneiro.

Tabela 6 - Percentagem cumulada, na Alimentação, do material retido em cada peneiro

Abertura (mm)	Síntese (g)	Percentagem Síntese	Cumulada
75	0,00	0,00	1,00
37,5	1946,00	0,28	0,72
19	1968,30	0,28	0,44
12,5	836,10	0,12	0,32
6,3	927,70	0,13	0,19
4	322,39	0,05	0,14
2	385,25	0,06	0,08
1	204,10	0,03	0,05
0,5	112,0	0,02	0,04
0,25	73,45	0,01	0,03
0,125	54,22	0,01	0,02
0,063	32,17	0,00	0,02
<0,063	108,52	0,02	0,00
Sub total	6970,27	0,00	0,00

A Figura 40 mostra a curva granulométrica relativa à Alimentação, e a sua respetiva função teórica de Schumann-Gaudin.

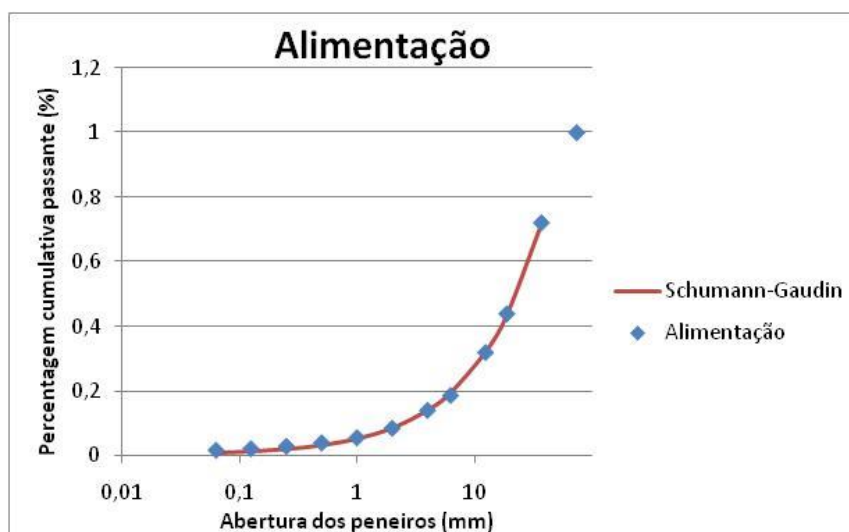


Figura 40 - Curva granulométrica referente à Alimentação. A função teórica foi ajustada para o módulo do calibre máximo  $a=58,8$  e módulo de distribuição  $m=0,73$

A Tabela 7 mostra a percentagem cumulada no Sobre-Crivo do material retido em cada peneiro.

Tabela 7 - Percentagem cumulada, no Sobre - Crivo, do material retido em cada peneiro

Abertura (mm)	Síntese (g)	Percentagem Síntese	Cumulada
75	0,00	0	1,000
37,5	4765,000	0,617	0,383
19	2872,500	0,372	0,011
12,5	2,800	0,000	0,010
6,3	11,700	0,002	0,009
4	5,900	0,001	0,008
2	6,600	0,001	0,007
1	6,600	0,001	0,006
0,5	8,800	0,001	0,005
0,25	12,500	0,002	0,003
0,125	13,800	0,002	0,002
0,063	10,500	0,001	0,000
<0,063	2,600	0,000	0,000
Sub total	7719,300	0,000	0,000



A Figura 41 mostra a curva granulométrica relativa ao Sobre-Crivo, e a sua respetiva função teórica de Schumann-Gaudin.

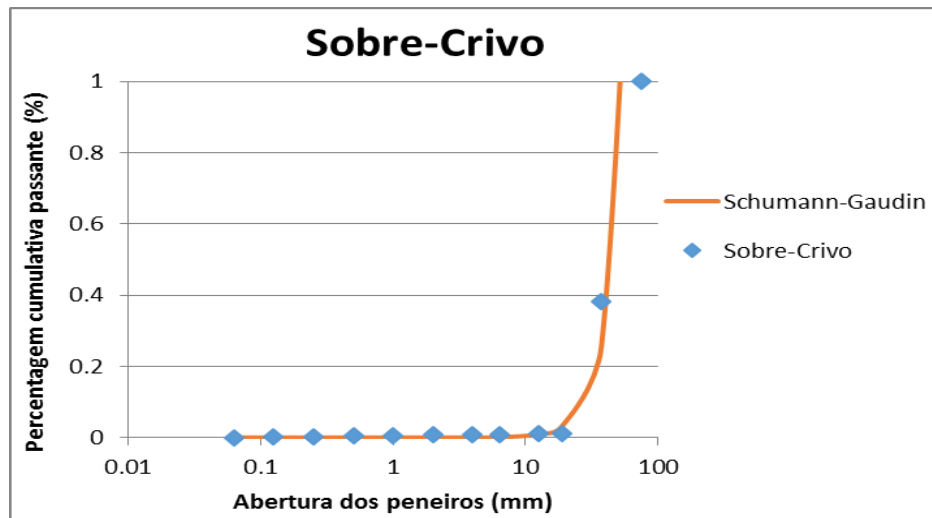


Figura 41 - Curva granulométrica referente ao Sobre - Crivo. A função teórica foi ajustada para o módulo do calibre máximo  $a=58,8$  e módulo de distribuição  $m=3$

A Tabela 8 mostra a percentagem cumulada no Infra-Crivo do material retido em cada peneiro.



Tabela 8 - Percentagem cumulada, no Infra - Crivo, do material retido em cada peneiro

Abertura (mm)	Síntese (g)	Percentagem Síntese	Cumulada
75	0,000	0,000	1,000
37,5	0,000	0,000	1,000
19	1766,900	0,256	0,744
12,5	1151,500	0,167	0,577
6,3	1532,000	0,222	0,356
4	831,943	0,120	0,235
2	1014,3923	0,147	0,088
1	362,311	0,052	0,036
0,5	127,541	0,018	0,017
0,25	59,275	0,009	0,0088
0,125	32,676	0,005	0,004
0,063	21,349	0,003	0,001
<0,063	6,950	0,001	0,000
Sub total	6906,837	0	0

A Figura 42 mostra a curva granulométrica relativa ao Infra-Crivo, e a sua respetiva função teórica de Schumann-Gaudin.

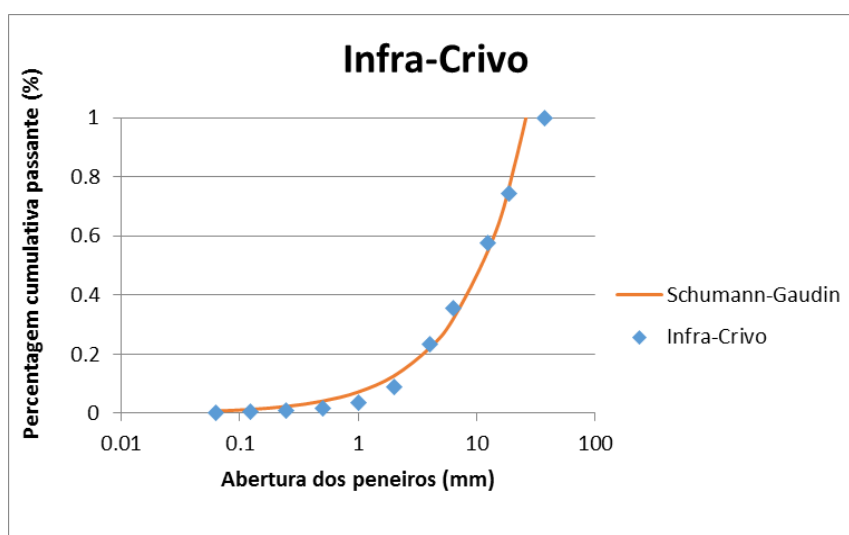


Figura 42 - Curva granulométrica referente ao Infra - Crivo. A função teórica foi ajustada para o módulo do calibre máximo  $a=26,2$  e módulo de distribuição  $m=0,80$



A função teórica Schumann-Gaudin quando  $x=a$ , isto é, a abertura dos peneiros é igual ao módulo do calibre máximo, a percentagem cumulativa é igual a 1 ou 100% de passante. Deste modo foi possível estimar o calibre máximo dos produtos. Fez-se o ajuste para a Alimentação obtendo-se um valor para o calibre máximo de 58,8mm e um módulo de distribuição de 0,73. Usando o mesmo valor do calibre máximo para o Sobre-Crivo, verificou-se um bom ajuste com um módulo de distribuição de 3, mostrando que o lote é mais estreito. Para o Infra-Crivo o calibre máximo foi de 26,2mm e o módulo de distribuição de 0,80 que é característico de uma distribuição de um lote granulométrico mais largo. Ainda relativamente ao calibre máximo, é de referir que este é inferior à luz de 35,5mm do crivo do conjunto de britagem.

#### 5.1.1. Curva de Partição

M. Leite 1986, refere que exprimir a eficiência de um dado classificador é medir a quantidade de partículas mal colocadas, designadas de *misplaced*.

A curva de partição permite caracterizar o parâmetro eficiência. Este tipo de curva é caracterizado por apresentar no eixo das abcissas a abertura dos peneiros (em mm), e no eixo das ordenadas a percentagem em peso das partículas da Alimentação que passaram no *oversize*. Esta curva é obtida experimentalmente, através das análises granulométricas.

Para o cálculo da curva de partição segundo M. Leite, 1986, são necessários os valores da percentagem peso referente ao Infra-Crivo ( $u_i$ ), Sobre-Crivo ( $o_i$ ) e Alimentação ( $a_i$ ), Tabela 9. A Figura 43 mostra a curva de partição obtida, por sua vez a Figura 44 mostra em específico, o tramo da curva necessário ao estudo do calibre de corte assim como a eficiência.



Para chegar à fórmula final para obtenção da curva de partição, é necessário partir das seguintes expressões:

$$A = O + U$$

e

$$A * ai = O * oi + U * ui$$

Então,

$$A * ai = O * oi + A * ui - O * ui$$

dividindo tudo por A:

$$\frac{O}{A} * (oi - ui) = ai - ui$$

isto é:

$$\frac{O * oi}{A * ai} = \frac{oi * (ai - ui)}{ai * (oi - ui)}$$

Temos então, as percentagens peso na tabela 9:





Tabela 9 - Dados referentes à curva de partição

<b>xx</b>	<b>Peso %</b>			<b>yy</b>
<b>Malhas (mm)</b>	<b>ai</b>	<b>oi</b>	<b>ui</b>	<b>oi(ai-ui)/ai(oi-ui)</b>
<b>75</b>	0,00	0,00	0,00	
<b>37,5</b>	27,92	61,73	0,00	1,000
<b>19</b>	28,24	37,21	25,58	0,301
<b>12,5</b>	12,00	0,04	16,67	0,001
<b>6,3</b>	13,31	0,15	22,18	0,005
<b>4</b>	4,63	0,08	12,05	0,010
<b>2</b>	5,53	0,09	14,69	0,010
<b>1</b>	2,93	0,09	5,25	0,013
<b>0,5</b>	1,61	0,11	1,85	0,010
<b>0,25</b>	1,05	0,16	0,86	-0,043
<b>0,125</b>	0,78	0,18	0,47	-0,238
<b>0,063</b>	0,46	0,14	0,31	-0,260
<b>&lt;0,063</b>	1,56	0,03	0,10	-0,471



Figura 43 - Curva de partição



Na figura 43 verifica-se que para os calibres menores inferiores a 0,25mm a curva de partição não apresenta um comportamento adequado. Este facto é devido à amostragem do Infra-Crivo ter sido feita com uma pá sobre a tela em movimento, o que resultou numa deficiência de finos. Mesmo assim foi possível concluir ao nível dos calibres graúdos como se pode ver na figura seguinte.

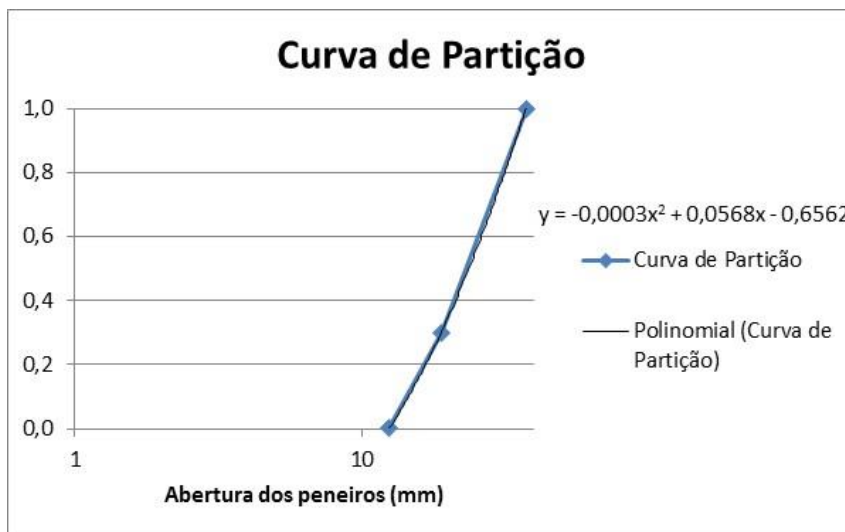


Figura 44 - Tramo da curva de partição referente à Figura anterior (43)

Na Figura 44 é possível ver a curva de partição com maior pormenor. Este tramo é o mais importante para o estudo da eficiência da crivagem na gama de calibres em jogo na separação. Optou-se por fazer um ajuste da curva de partição, através de um polinómio de segundo grau:

Equação 1

$$Y = -0,0003x^2 + 0,0568x - 0.6562$$

Esta equação é de extrema importância, uma vez que é nela vai ser obtido o valor do calibre de corte  $x$  para  $y=0,5$ .



Segundo M. Leite (1986) um classificador perfeito a curva de partição terá a forma de um degrau, enquanto do processo industrial os classificadores são imperfeitos mostrando curvas crescentes mais suaves (Figura 45).

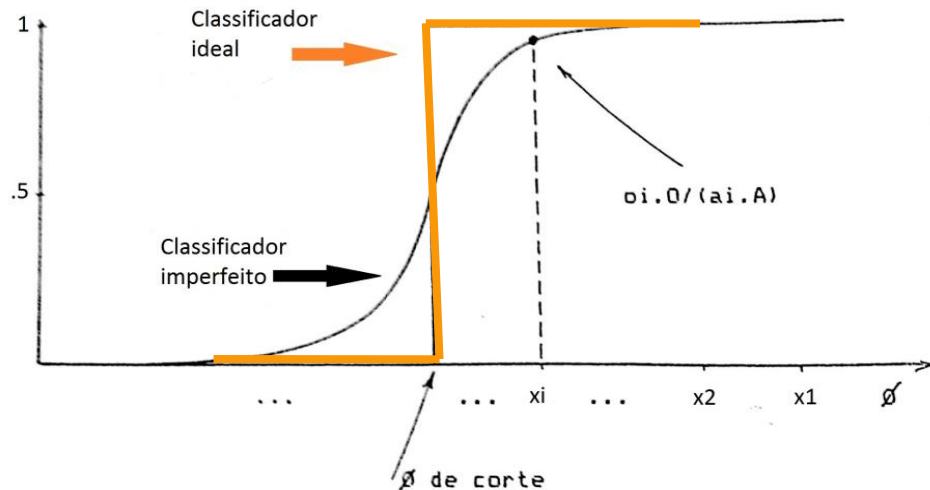


Figura 45 - Curva de Partição de um classificador ideal. Adaptado de Leite, M.R.M.(1986)

### 5.1.2. Calibre de corte

O calibre de corte define-se como o calibre obtido através da ordenada de 50 % na curva de partição, indica a igual probabilidade dos grãos serem classificados no oversize ou no undersize. Para determinar o calibre de corte nesta curva de partição, é necessário igualar a equação 1 a  $y=0,5$  ficando:

$$-0,0003x^2 + 0,0568x - 0.6562 = 0,5$$



Com isto, obtém-se duas raízes do polinómio de segundo grau com os valores  $x = 23,198$  e  $x = 166,135$ . Destas duas raízes consideramos a primeira. Estabelecendo o calibre de corte de 23,2mm.

Este resultado (23,2mm) é inferior aquele obtido (26,2mm) na modelação teórica do calibre máximo do Infra-Crivo, com a curva Schumann-Gaudin. O primeiro valor refere-se a 50% dos deslocados no Sobre-Crivo e o segundo valor diz respeito ao calibre máximo encontrado no Infra-Crivo. Todos estes valores são inferiores à luz do crivo que é de 35,5mm.

## 5.2. Curvas Granulométricas (Granulação)

A Tabela 10 mostra a percentagem cumulada, no crivo correspondente ao Areão 0/4, do material retido em cada peneiro.

Tabela 10 - Percentagem cumulada, no Areão 0/4, do material retido em cada peneiro

Abertura (mm)	Peso (g)	% Peso	Cumulada
75	0,000	0,000	1,000
37,5	0,000	0,000	1,000
19	0,000	0,000	1,000
12,5	0,000	0,000	1,000
6,3	2,800	0,014	0,986
4	14,800	0,075	0,910
2	44,900	0,229	0,682
1	65,300	0,333	0,349
0,5	40,500	0,206	0,143
0,25	20,300	0,103	0,039
0,125	6,400	0,033	0,007
0,063	1,300	0,007	0,000

A Figura 46 mostra a curva granulométrica relativa ao Areão 0/4, e a sua respetiva função teórica de Schumann-Gaudin.

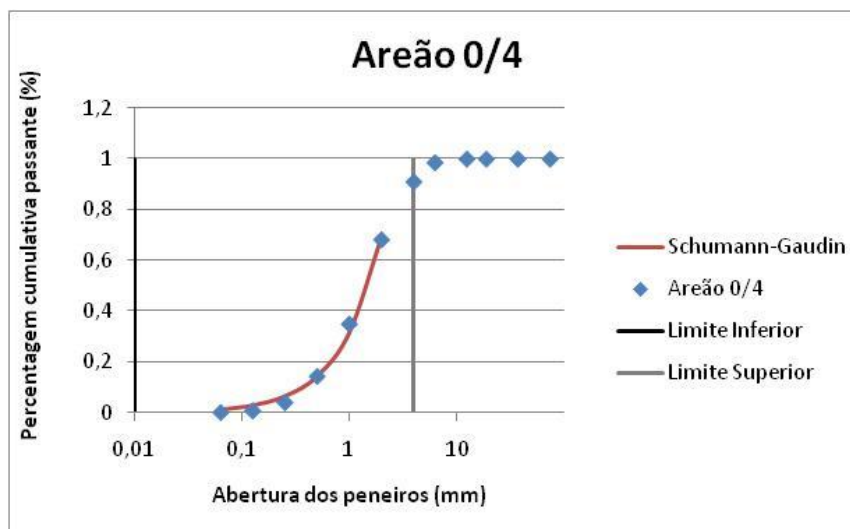


Figura 46 - Curva granulométrica referente ao Areão 0/4

A Tabela 11 mostra a percentagem cumulada, no crivo correspondente à Gravilha 2/6, do material retido em cada peneiro.

Tabela 11 - Percentagem cumulada, da Gravilha 2/6, do material retido em cada peneiro

Abertura (mm)	Peso (g)	% Peso	Cumulada
75	0,000	0,000	1,000
37,5	0,000	0,000	1,000
19	0,000	0,000	1,000
12,5	0,000	0,000	1,000
6,3	6,300	0,014	0,986
4	28,200	0,063	0,923
2	52,800	0,118	0,805
1	124,500	0,278	0,527
0,5	112,900	0,252	0,276
0,25	80,600	0,180	0,0956
0,125	29,900	0,067	0,029
0,063	10,700	0,024	0,005



A Figura 47 mostra a curva granulométrica relativa à Gravelha 2/6, e a sua respetiva função teórica de Schumann-Gaudin.

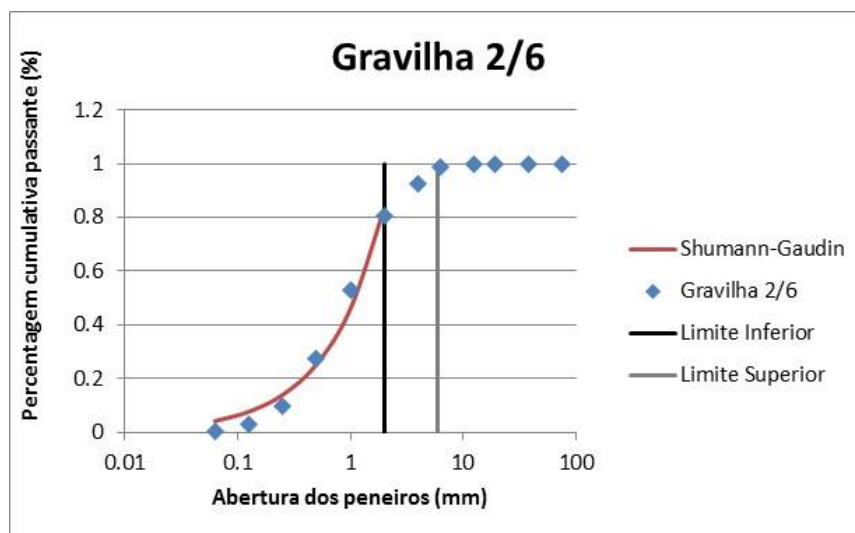


Figura 47 - Curva granulométrica referente à Gravelha 2/6

A Tabela 12 mostra a percentagem cumulada, no crivo correspondente à Brita 6/14, do material retido em cada peneiro.

Tabela 12 - Percentagem cumulada, na Brita 6/14, do material retido em cada peneiro

Abertura (mm)	Peso (g)	% Peso	Cumulada
75	0,000	0,000	1,000
37,5	0,000	0,000	1,000
19	0,000	0,000	1,000
12,5	1863,400	0,143	0,857
6,3	10423,400	0,799	0,058
4	469,900	0,036	0,022
2	116,000	0,009	0,013
1	65,200	0,005	0,008
0,5	31,600	0,002	0,006
0,25	22,800	0,002	0,004
0,125	22,500	0,002	0,002
0,063	24,200	0,002	0,001



A Figura 48 mostra a curva granulométrica relativa à Brita 6/14, e a sua respetiva função teórica de Schumann-Gaudin.

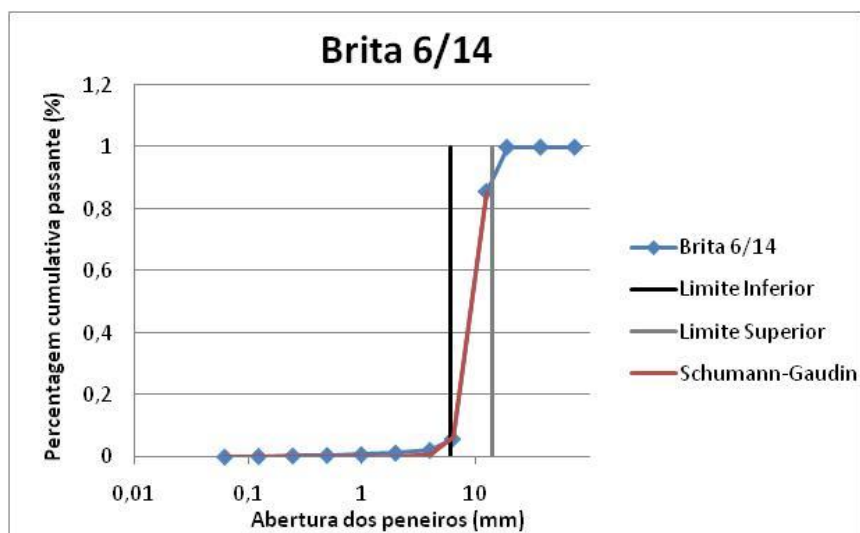


Figura 48 - Curva granulométrica referente à Brita 6/14

A Tabela 13 mostra a percentagem cumulada, no crivo correspondente à Brita 11/22, do material retido em cada peneiro.

Tabela 13 - Percentagem cumulada, na Brita 11/22, do material retido em cada peneiro

Abertura (mm)	Peso (g)	% Peso	Cumulada
75	0,000	0,000	1,000
37,5	0,000	0,000	1,000
19	5134,900	0,291	0,709
12,5	12280,100	0,695	0,014
6,3	185,700	0,011	0,003
4	10,300	0,001	0,003
2	6,400	0,000	0,002
1	8,100	0,000	0,002
0,5	8,100	0,000	0,002
0,25	8,700	0,000	0,001
0,125	8,900	0,000	0,001
0,063	8,300	0,000	0,000



A Figura 49 mostra a curva granulométrica relativa à Brita 11/22, e a sua respetiva função teórica de Schumann-Gaudin.



Figura 49 - Curva granulométrica referente à Brita 11/22

A Tabela 14 mostra a percentagem cumulada, no crivo correspondente à Brita 22/45, do material retido em cada peneiro.

Tabela 14 - Percentagem cumulada, na Brita 22/45, do material retido em cada peneiro

Abertura (mm)	Peso (g)	% Peso	Cumulada
75	0,000	0,000	1,000
37,5	0,000	0,000	1,000
19	16185,000	0,998	0,002
12,5	5,100	0,000	0,001
6,3	1,300	0,000	0,001
4	0,500	0,000	0,001
2	1,300	0,000	0,001
1	2,100	0,000	0,001
0,5	2,300	0,000	0,001
0,25	3,100	0,000	0,001
0,125	4,400	0,000	0,000
0,063	4,200	0,000	0,000





A Figura 50 mostra a curva granulométrica relativa à Brita 22/45, e a sua respetiva função teórica de Shumann-Gaudin.

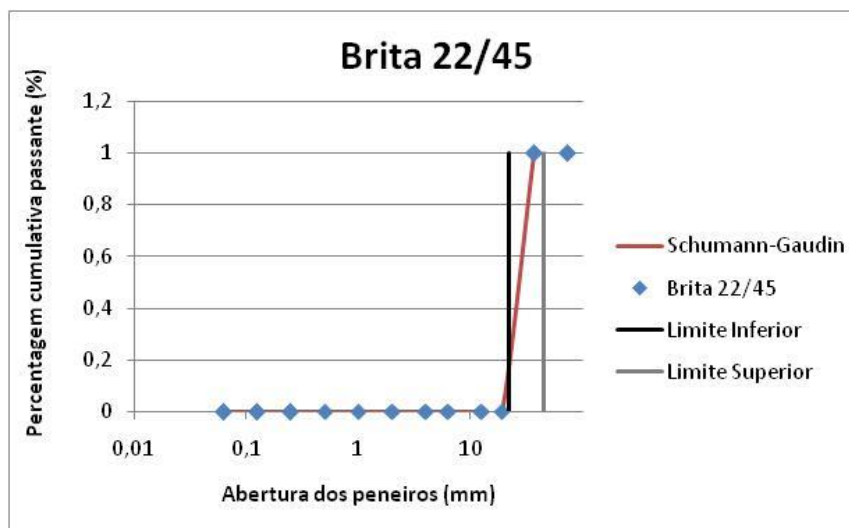


Figura 50 - Curva granulométrica referente à Brita 22/45

A Tabela 15 mostra a percentagem cumulada, no crivo correspondente à Brita 45/125, do material retido em cada peneiro.

Tabela 15 - Percentagem cumulada, na Brita 45/125, do material retido em cada peneiro

Abertura (mm)	Peso (g)	% Peso	Cumulada
75	0,000	0,000	1,000
37,5	12402,000	0,722	0,278
19	4746,500	0,276	0,001
12,5	0,000	0,000	0,001
6,3	0,500	0,000	0,001
4	1,200	0,000	0,001
2	1,700	0,000	0,001
1	2,100	0,000	0,001
0,5	2,700	0,000	0,001
0,25	3,700	0,000	0,001
0,125	4,100	0,000	0,000
0,063	3,900	0,000	0,000



A Figura 51 mostra a curva granulométrica relativa à Brita 45/125, e a sua respetiva função teórica de Schumann-Gaudin.

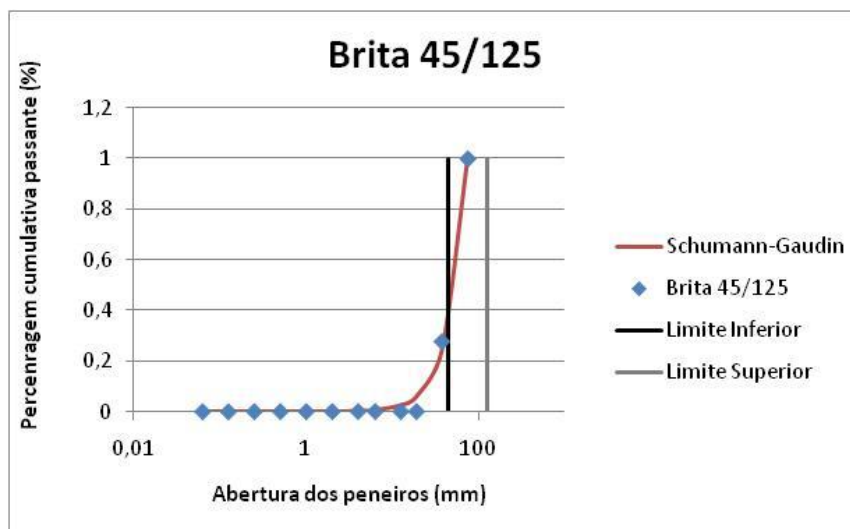


Figura 51 - Curva granulométrica referente à Brita 45/125

Na Tabela 16 estão resumidos os parâmetros obtidos pelo ajuste de Schumann-Gaudin de todos os lotes.

Tabela 16 - Parâmetros teóricos obtidos através do ajuste de Schumann - Gaudin

	Referência Laboratorial		Referência da Empresa	
Produto	Calibre Máximo (a)	Módulo de Distribuição (m)	Limite mínimo	Limite máximo
Alimentação	58,8	0,73	-	-
Sobre-Crivo	58,8	3,0	-	-
Infra-Crivo	26,2	0,80	-	-
Areão 0/4	2,77	1,13	0	4
Gravilha 2/6	2,47	0,86	2	6
Brita 6/14	13,01	3,84	6	14
Brita 11/22	19,71	9,38	11	22
Brita 22/45	37,50	9,48	22	45
Brita 45/125	74,84	2,05	45	125



Ao fazer uma análise dos parâmetros na Tabela 16, é possível verificar que os valores referentes ao calibre máximo (parâmetro **a**) obtidos através do ajuste de Schumann-Gaudin não ultrapassam os limites máximos de cada lote, referenciados pela empresa. É de notar um valor bastante baixo do parâmetro **a** (calibre máximo) no lote referente à gravilha 2/6, um calibre máximo muito perto do valor referente ao calibre inferior. Este pormenor pode ser visto também na figura referente a este lote, Figura 47. É possível notar uma maior concentração de material fora dos limites de referência (2/6). Uma possível causa para estes valores, pode ter sido aquando a recolha da amostra do lote em questão. Possivelmente pode ter vindo com excesso de material de calibre inferior, daí resultar em valores bastante baixos quer para a curva granulométrica quer nos parâmetros de ajuste Schumann-Gaudin.

Na Figura 52 é possível ver a comparação entre os valores relativos ao limite superior da empresa, contra os valores de calibre máximo obtidos na análise granulométrica.

Um outro aspecto importante é o calibre máximo referente ao lote Brita 45/125. Neste caso é possível notar que o calibre máximo ainda está longe do limite superior. Uma possível explicação pode ter sido uma falha no processo de amostragem. Ou então, uma vez que este material já vem de uma fragmentação primária anterior (britagem) pode-se dar o caso de este material nunca chegar perto do limite superior, 125mm, referente ao lote 45/125.

Por sua vez na Figura 53, é possível ver a mesma representação, calibre máximo (**a**) contra os valores dos limites superiores de cada lote, mas neste caso foi omitido o último lote, Brita 45/125.

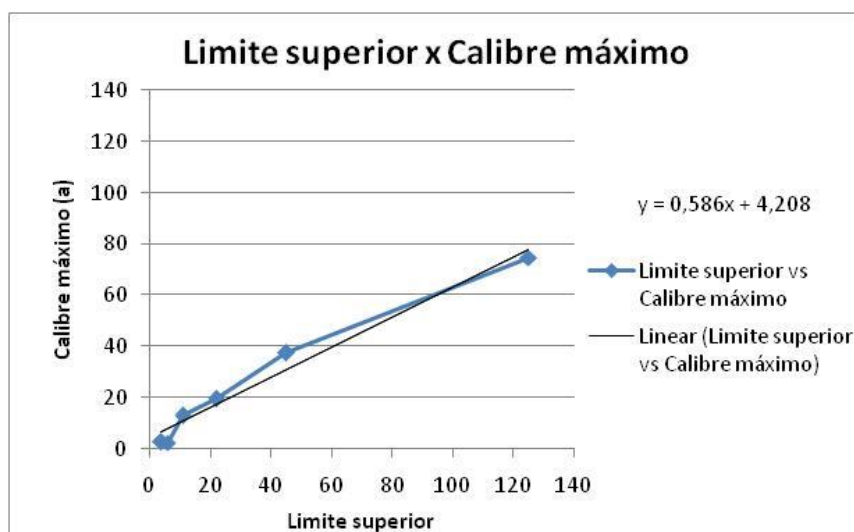


Figura 52 - Representação dos valores do calibre máximo(a) vs o limite superior de cada lote

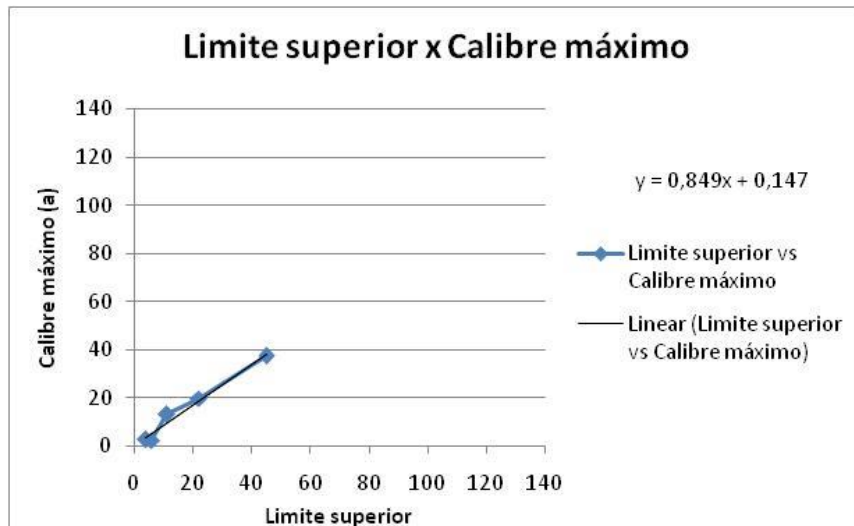


Figura 53 - Representação dos valores do calibre máximo(a) vs limite superior, excepto o lote Brita 45/125

É possível verificar que na Figura 52, onde estão incluídos todos os lotes, a tendência dos pontos é para uma recta de declive ( $m=0,586$ ) relativamente baixo. O que indica uma diferença significativa, entre os limites superiores da empresa e



os valores de calibres máximos obtidos através do ajuste de Schumann-Gaudin. Com foi referido no último parágrafo, o lote Brita 45/125 tem um calibre máximo (parâmetro **a**) afastado do limite superior. Daí a Figura 53 ter sido realizado excluindo este lote, Brita 45/125, sendo possível analisar que o declive da recta obtida com estes pontos já possui um declive ( $m=0,849$ ) mais perto de 1. Indicando uma maior proximidade dos limites superiores com os calibres máximos.



## 6. Conclusão

Com este trabalho foi possível descrever e caraterizar o processo de fragmentação e classificação (beneficiação) referente aos agregados produzidos na BRIMO – Britas de Mouquim.

Esta zona está localizada na zona centro-este de Portugal, e enquadra-se numa região com importantes afloramentos quartzíticos, entre as Caldas de S. Jorge e Arrancada do Vouga. Estes afloramentos constituem dois alinhamentos descontínuos distanciados de aproximadamente 2 km, dando origem a uma estrutura sinforma deitada, mergulhada para Oeste. Esta zona, tem a sua geologia composta através do contacto entre unidades da Zona de Ossa Morena (ZOM) e unidades da Zona Centro Ibérica (ZCI).

No que diz respeito à fragmentação e classificação, a primeira fase, fragmentação, começa pela britagem ou fragmentação primária, que prepara o material para entrar no granulador. Na britagem os blocos provenientes da exploração são reduzidos de tamanho, originando material mais fino (Infra-Crivo) para fazer Tout-Venant, enquanto que o restante (Sobre-Crivo) vai para o stock intermédio para posteriormente entrar no granulador. Após o material entrar na segunda fase de fragmentação, este vai ser fragmentado e crivado posteriormente dando origem aos diversos lotes de material, Areão 0/4, Gravilha 2/6, Brita 6/14, Brita 11/22, Brita 22/45 e Brita 45/125. Esta crivagem é do tipo crivagem húmida, realizada com água.

Na fase laboratorial as amostras foram ensaiadas através da norma NP EN 933-1. As curvas granulométricas obtidas, permitiram obter as curvas de ajuste Schumann – Gaudin. Com estas curvas foi possível obter os parâmetros **a** (calibre máximo) e **m** (módulo de distribuição). Com o calibre máximo, **a**, é possível fazer uma comparação entre os valores obtidos, como os fixados pela pedreira. Ao fazer uma análise dos parâmetros na Tabela 20, é possível verificar que os valores referentes ao calibre máximo obtidos através do ajuste de Schumann-Gaudin não ultrapassam os limites máximos de cada lote, referenciados pela empresa.



É de notar um valor bastante baixo do parâmetro **a** (calibre máximo) no lote referente à gravilha 2/6, um calibre máximo muito perto do valor referente ao calibre inferior. Possivelmente durante a amostragem houve uma falha, em que poderá ter havido maior recolha de material mais fino. Um outro aspecto importante é o calibre máximo referente ao lote Brita 45/125. Neste caso é possível notar que o calibre máximo (74,8mm) ainda está longe do limite superior. Uma possível explicação pode ter sido uma falha no processo de amostragem. Ou então, uma vez que este material já vem de uma fragmentação primária anterior (britagem) pode dar-se o caso de este material nunca chegar perto das dimensões do limite superior, 125mm, referente ao lote 45/125.

Ao realizar o gráfico dos calibre máximos de cada lote obtidos contra os limites da pedreira, é possível analisar que a tendência dos pontos é para uma recta com declive ( $m=0,586$ ) relativamente baixo, Figura 52. O que indica uma diferença significativa, entre os limites superiores da empresa e os valores de calibres máximos obtidos através do ajuste de Schumann-Gaudin. Ao excluir o último lote, Brita 45/125, é possível analisar que a reta do gráfico tende para valores de declive de aproximadamente  $m=0,849$ . Sendo um valor mais perto de  $m=1$ , o que indica que os valores do parâmetro **a**, estão relativamente mais próximos dos valores de referência da empresa. É possível notar que cada curva granulométrica referente ao processo de granulação, contém os limites inferior e superior referenciados pela empresa. É possível concluir que, de um modo geral os limites para a classificação obtidos através dos ensaios estão de acordo com os limites estabelecidos.

No que diz respeito à curva de partição, a Figura 44 mostra a curva de partição obtida através dos dados laboratoriais. Ao comparar com a curva de partição de referência, Figura 45, é possível verificar que a curva obtida tem uma maior tendência para um “S”. Indicando assim um classificador imperfeito,

Já o calibre de corte, este apresenta um valor de  $x = 23,2\text{mm}$ , isto indica que, neste valor existe igual probabilidade dos grãos serem classificados no oversize (Sobre – Crivo) ou no undersize (Infra – Crivo). Este valor é inferior ao calibre



máximo do Infra-Crivo (26,2 mm) obtido pelo ajuste de Schumann-Gaudin primeiro crivo após a britagem, onde o crivo contém uma malha de luz 35,5 mm.

Os ajustes teóricos efetuados sobre as curvas granulométricas permitiram caracterizar os calibres máximos dos lotes que não eram possíveis de definir utilizando a meia série de peneiros disponíveis.





## 7. Referências Bibliográficas

- Chaminé, H. I.; Gomes, A.; Teixeira, J.; Fonseca, P.E.; Pinto de Jesus, A.; Gama Pereira, L. C.; Soares de Andrade, A.A.; Fernandes, J.P.; Flores, D.; Araújo, M.A. & Rocha, F.T. ( 2004) - Geologia, geomorfologia e estratigrafia dos domínios estruturais de Carvoeiro- Caldas de S. Jorge e de Soutelo - Arrancada do Vouga (faixa de cisalhamento de Porto – Coimbra – Toma, NW de Portugal) Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña. Vol. 29, pp. 299-330.
- Leite, M.R.M. (1986) – Fragmentação de classificação de rochas e minério – um curso para o 3º ano da licenciatura em Engenharia de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- Luz, A. B.; Sampaio, J. A.; França, S.C.A. ( 2010) – Tratamento de minérios – 5ª edição. CETEM/MCT, Rio de Janeiro.

### Normas:

- NP EN 933-1 – Análise granulométrica – Método de peneiração